Un nuovo sguardo sullo spazio-tempo

Un nuovo approccio al problema della gravità quantistica, ormai vecchio di decenni, torna alle origini e mostra come assemblare i componenti fondamentali dello spazio e del tempo

di Jan Ambjørn, Jerzy Jurkiewicz e Renate Loll

IN SINTESI

- È noto che la teoria quantistica e la teoria della relatività generale di Einstein sono in conflitto. I fisici hanno tentato a lungo di riconciliarle in una teoria della gravità quantistica, ma con scarsi risultati.
- Il nuovo approccio non si basa su componenti esotiche, ma fornisce un nuovo modo di applicare le leggi esistenti a componenti elementari dello spazio-tempo che si dispongono spontaneamente.
- Questo approccio dimostra che uno spazio-tempo quadridimensionale emerge dinamicamente da pochi ingredienti di base. E suggerisce a piccole scale che lo spazio-tempo uniforme si trasformi gradualmente in un frattale.

Come nacquero lo spazio e il tempo? Come formarono il vuoto uniforme quadridimensionale che fa da sfondo alla realtà fisica? Come appaiono, se li guardiamo da molto vicino? Sono domande che segnano l'ultima frontiera della scienza moderna e guidano la ricerca di una teoria della gravità quantistica: l'unificazione, a lungo inseguita, della teoria della relatività generale di Einstein e della teoria quantistica.

La teoria della relatività descrive il modo in cui lo spazio-tempo, a grandi scale, assume varie forme, producendo quella che noi percepiamo come forza di gravità. La teoria quantistica, invece, descrive le leggi della fisica a scala atomica e subatomica, senza tenere conto degli effetti gravitazionali. La teoria della gravità quantistica intende descrivere lo spazio-tempo alla scala più piccola – il vuoto tra le particelle elementari più piccole a noi note – per mezzo di leggi quantistiche, e possibilmente spiegarlo in termini di componenti fondamentali.

La teoria delle superstringhe è spesso citata come il miglior candidato per una teoria del genere, sebbene finora non abbia dato risposta a nessuna delle domande più urgenti. Al contrario, seguendo la sua logica interna, ha scoperto livelli ancora più complessi di ingredienti nuovi ed esotici e delle loro relazioni, generando una varietà disparata di risultati possibili.

Negli ultimi anni, dalla nostra collaborazione è nata un'alternativa incoraggiante a questa «autostrada» della fisica teorica già percorsa molte volte. L'alternativa segue una ricetta tanto semplice da apparire quasi imbarazzante: prendete pochi ingredienti, assemblateli secondo i principi quantistici (nulla di esotico), mescolateli bene e lasciate riposare: avrete creato lo spazio-tempo quantistico. Il processo è talmente lineare da poter essere simulato su un computer portatile.

Jean-Francois Podevin

In altre parole, se pensiamo allo spazio-tempo vuoto come a una sostanza immateriale composta da un gran numero di minuscole particelle prive di struttura, e lasciamo interagire questi componenti secondo regole semplici fissate dalla gravità e dalla teoria quantistica, essi spontaneamente formeranno un insieme che, per molti aspetti, somiglia all'universo che conosciamo. Il processo è simile a quello che tiene insieme le molecole nei solidi cristallini o amorfi.

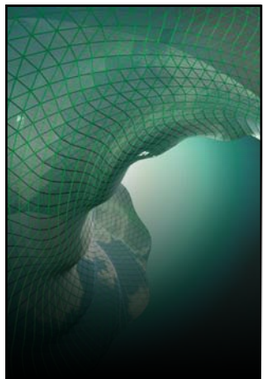
Lo spazio-tempo, dunque, potrebbe somigliare più a un piatto di verdure saltate in padella che a un'elaborata torta nuziale. Inoltre, a differenza di altri approcci alla gravità quantistica, la nostra ricetta è assai robusta: se nelle simulazioni variamo i dettagli, il risultato cambia poco. Questa robustezza ci fa pensare che la strada sia quella giusta. Se il risultato fosse sensibile alla posizione esatta di ciascun componente di questo enorme complesso, si potrebbe generare un gran numero di forme barocche, ciascuna a priori ugualmente probabile. E così si perderebbe ogni capacità di spiegare perché l'universo si è evoluto nel modo che conosciamo.

Meccanismi simili di auto-assemblaggio e di auto-organizzazione si verificano in fisica, in biologia e in altri campi della scienza. Un esempio è il comportamento degli stormi di uccelli come gli storni europei. Ciascun volatile interagisce solo con un piccolo numero di vicini, e nessuno gli dice come comportarsi. Tuttavia lo stormo si forma, e si muove come un corpo unico. Lo stormo ha proprietà collettive, o emergenti, che non sono proprie del comportamento del singolo storno.

Breve storia della gravità quantistica

I precedenti tentativi di spiegare la struttura quantistica dello spazio-tempo come un processo che emerge spontaneamente dalle leggi fisiche hanno avuto un successo limitato. Si basavano sulla gravità quantistica euclidea, un programma di ricerca iniziato alla fine degli anni settanta e reso popolare dal libro *Una breve storia del tempo* di Stephen Hawking. Questo programma si fonda su un principio di base della meccanica quantistica: la sovrapposizione. Ogni oggetto, classico o quantistico, è in un certo stato che ne determina, per esempio, posizione e velocità.

Ma mentre lo stato di un oggetto classico è caratterizzato da un unico insieme di numeri, lo sta-



LE TEORIE DELLA GRAVITÀ QUANTISTICA

TEORIA DELLE STRINGHE
È l'approccio preferito da molti fisici teorici. Non è solo una teoria della gravità quantistica, ma di ogni materia e forza. Si basa sull'idea che le particelle (comprese quelle ipotetiche che trasmettono la gravità) siano corde che vibrano.

GRAVITÀ QUANTISTICA A LOOP
La principale alternativa alla teoria delle stringhe, adopera una nuova tecnica per applicare le regole quantistiche alla teoria della relatività generale di Einstein. Lo spazio è diviso in «atomi» discreti di volume.

GRAVITÀ QUANTISTICA EUCLIDEA
Reso famoso dal fisico Stephen Hawking, questo approccio suppone che lo spazio-tempo emerga da una media quantistica di tutte le possibili forme. Mette sullo stesso piano lo spazio e il tempo.

TRIANGOLAZIONE DINAMICA CAUSALE
È l'argomento di questo articolo, approssima lo spazio-tempo con un mosaico di triangoli, che incorporano una distinzione tra causa ed effetto. A piccole scale, lo spazio-tempo ha forma frattale.

to di un oggetto quantistico è molto più ricco. È la somma, o sovrapposizione, di tutti i possibili stati classici. Per esempio, una biglia in un biliardo classico si muove lungo un'unica traiettoria con una precisa posizione e una precisa velocità in ogni istante. Il moto di un elettrone, molto più piccolo, non si può descrivere nello stesso modo. Il suo movimento è descritto da leggi quantistiche, secondo cui può trovarsi allo stesso tempo in un'ampia gamma di posizioni e velocità. Quando un elettrone si muove dal punto A al punto B in assenza di forze esterne, non segue solo la linea retta tra A e B, ma tutti i possibili percorsi simultaneamente. Questa idea qualitativa della partecipazione congiunta di tutti i possibili percorsi dell'elettrone si traduce in una regola matematica formulata da Richard Feynman: la media ponderata di tutte le varie possibilità.

Seguendo questa regola, si può calcolare la probabilità di trovare l'elettrone in un qualsiasi intervallo di posizioni e velocità, diverse dalla linea retta che ci aspetteremmo se l'elettrone seguisse le leggi della meccanica classica. Il comportamento quantomeccanico delle particelle è caratterizzato da deviazioni da un'unica traiettoria precisa, dette fluttuazioni quantistiche. Minore è la dimensione di un sistema fisico, tanto più importanti sono le fluttuazioni quantistiche.

La gravità quantistica euclidea applica il principio di sovrapposizione all'intero universo. In questa ipotesi, la sovrapposizione non consiste in diverse traiettorie delle particelle, ma nei diversi modi in cui l'universo potrebbe evolvere nel tempo, in particolare nelle varie forme possibili dello spazio-tempo. Per poter trattare il problema, di norma i fisici considerano solo la forma generale e la dimensione dello spazio-tempo, piuttosto che ogni sua immaginabile contorsione (si veda *La cosmologia quantistica e l'origine dell'universo*, di Jonathan J. Halliwell, in «Le Scienze» n. 282, febbraio 1992).

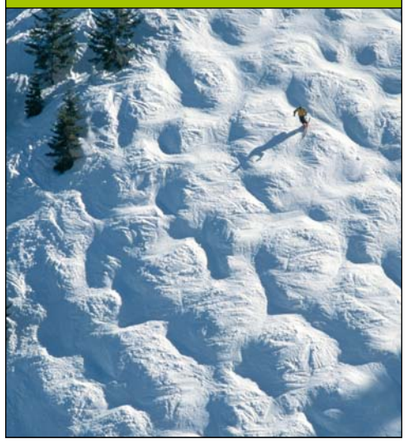
La gravità quantistica euclidea ha fatto un notevole balzo in avanti negli anni ottanta e novanta grazie allo sviluppo di potenti simulazioni informatiche. Nelle simulazioni, le geometrie curve dello spazio-tempo sono rappresentate da piccoli blocchi fondamentali che, per comodità, si suppongono di forma triangolare. Le strutture composte da triangoli approssimano efficacemente superfici curve, e per questo motivo spesso sono usate nelle animazioni al computer. Per lo spazio-tempo, i blocchi elementari sono generalizzazioni a quattro dimensioni del triangolo, i «simplessi quadridimensionali». Così come unendo triangoli lungo gli spigoli si ottengono superfici curve bidimensionali, allo stesso modo unendo simplessi quadridimensionali lungo le loro «facce» (che in realtà sono tetraedri tridimensionali) si può generare uno spazio-tempo quadridimensionale.

I piccoli blocchi fondamentali, in sé, non hanno significato fisico immediato. Se si potesse esaminare lo spazio-tempo reale con un microscopio ultrapotente, non si vedrebbero piccoli triangoli. Sono solo semplici approssimazioni. L'unica informazione fisicamente rilevante deriva dal comportamento collettivo dei blocchi fondamentali se si immagina di rimpicciolirli tutti fino ad assegnare loro dimensione nulla. In questo limite, niente dipende più dalla forma triangolare, cubica, pentagonale o mista dei blocchi iniziali.

L'indipendenza da vari dettagli di piccola scala è conosciuta anche col nome di «universalità». È un fenomeno ben noto in fisica statistica, la scienza del moto molecolare nei gas e nei fluidi; queste sostanze si comportano in modo analogo, qualunque sia la loro composizione. L'universalità caratterizza sistemi composti da molte unità interagenti e si manifesta a una scala molto più grande dell'unità elementare. Analogamente, in uno stormo di storni il colore, la dimensione, l'apertura alare sono irrilevanti per il comportamento in volo dello stormo nel suo insieme. A scala macroscopica si possono percepire solo pochi dettagli microscopici.

Spazio: ultima frontiera

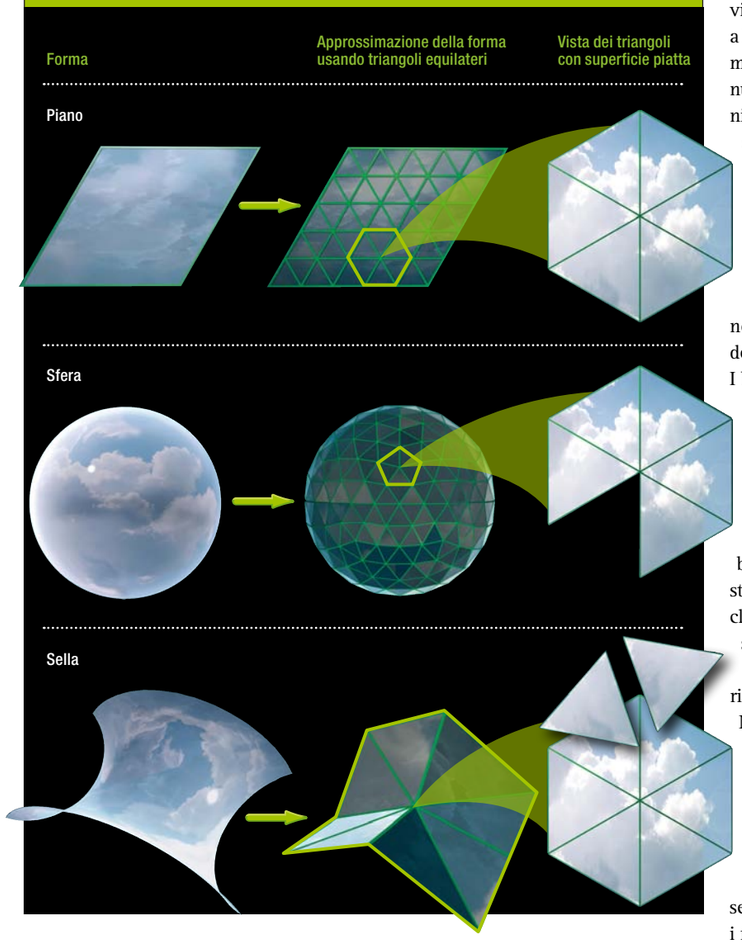
Di solito pensiamo allo spazio come puro vuoto, ma in realtà ha una struttura invisibile che guida il modo in cui ci spostiamo, come le cunette di una discesa guidano uno sciatore. Noi percepiamo questa struttura come forza di gravità. Spiegare in dettaglio la forma dello spazio-tempo è l'obiettivo principale di ogni teoria della gravità quantistica.



Jean-Francois Podevin; Karl Weatherly/Corbis (*sciatore*)

Un mosaico di triangoli

Per determinare come lo spazio si autocostruisce, i fisici devono prima trovare un modo per descriverne la forma. A questo scopo hanno individuato i triangoli e le loro generalizzazioni in dimensioni superiori, che, disposti a mosaico, approssimano efficacemente una forma curva. La curvatura in un punto si riflette nell'angolo totale sotteso dai triangoli che lo circondano. Per una superficie piatta, l'angolo è esattamente di 360 gradi, ma per altre superfici può essere minore o maggiore.



Jean-Francois Podevin

Accartocciarsi

Servendosi di simulazioni al computer, i teorici della gravità quantistica avevano cominciato a esplorare le conseguenze della sovrapposizione di forme dello spazio-tempo che la relatività classica non riesce a trattare; in particolare, la struttura fortemente curvata a piccolissime scale di distanza. Questo regime non perturbativo è la caratteristica che interessa maggiormente i fisici, ma per capirlo non bastano i calcoli con carta e penna.

Sfortunatamente le simulazioni avevano mostrato che la gravità quantistica euclidea mancava di un ingrediente fondamentale in qualche punto del ragionamento. I fisici avevano scoperto che le sovrapposizioni non perturbative di universi quadridimensionali sono intrinsecamente instabili. Le fluttuazioni quantistiche della curvatura a piccola scala, caratteristiche dei vari universi sovrapposti che contribuiscono alla media, non si eliminano a vicenda per produrre l'universo classico, uniforme a larga scala. Al contrario, si rinforzano reciprocamente accartocciando l'intero universo in una minuscola palla con un numero infinito di dimensioni. In uno spazio di questo tipo, due punti arbitrari sono separati da una distanza minima anche se lo spazio ha un volume enorme. In alcuni casi, lo spazio muove verso l'altro estremo, divenendo sottile ed esteso come un polimero con molti rami. Nessuna di queste possibilità somiglia al nostro universo.

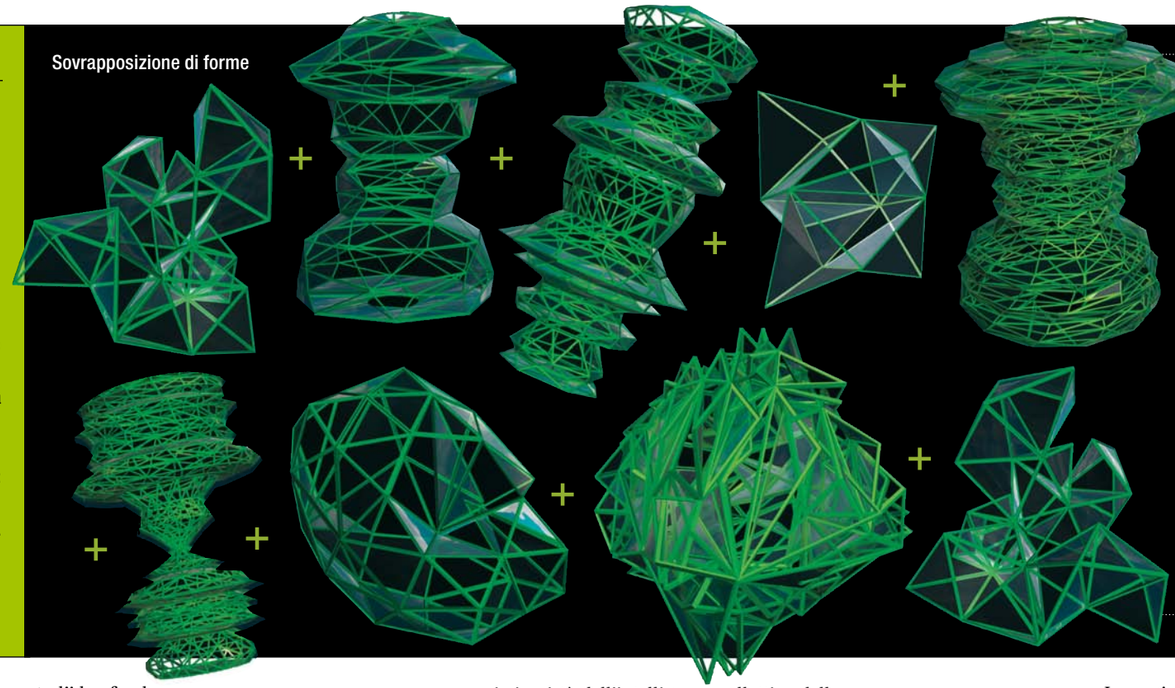
Prima di riesaminare i ragionamenti che hanno portato i fisici in questo vicolo cieco, consideriamo un aspetto singolare di questo risultato. I blocchi fondamentali sono quadridimensionali, tuttavia producono uno spazio con un numero infinito di dimensioni (l'universo accartocciato) o bidimensionale (l'universo polimerico). Una volta fatto uscire il genio dalla bottiglia, ammettendo la possibilità di grandi fluttuazioni quantistiche del vuoto, anche una nozione di base come la dimensione diventa mutevole. Questo risultato non si poteva prevedere con la teoria classica della gravità, in cui il numero di dimensioni è fissato nelle ipotesi.

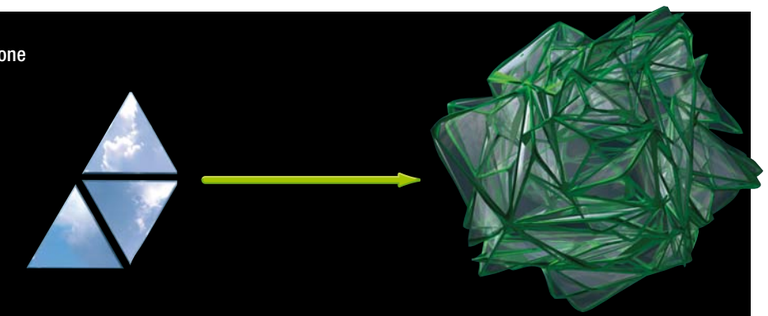
Una conseguenza di quanto spiegato fin qui rischia di deludere gli appassionati di fantascienza. Nei romanzi di fantascienza compaiono spesso i tunnel spazio-temporali, sottili scorciatoie che permettono di muoversi tra regioni dell'universo altrimenti lontanissime. I tunnel spazio-temporali ci entusiasmano perché suggeriscono la possibilità di viaggiare nel tempo e di trasmettere segnali più velocemente della luce. Anche se questi fenomeni non sono mai stati osservati, i fisici ipotizzarono che i tunnel spazio-temporali possano trovare una spiegazione nella teoria della gravità quantistica, ancora ignota. Dopo i risultati negativi delle simulazioni della gravità quantistica euclidea, la possibilità di tunnel spazio-temporali appare remota. Questi tunnel si presentano in una varietà tanto grande da dominare sulla sovrapposizione e destabilizzarla, motivo per cui l'universo quantistico non cresce oltre una regione dello spazio piccola ma fortemente interconnessa.

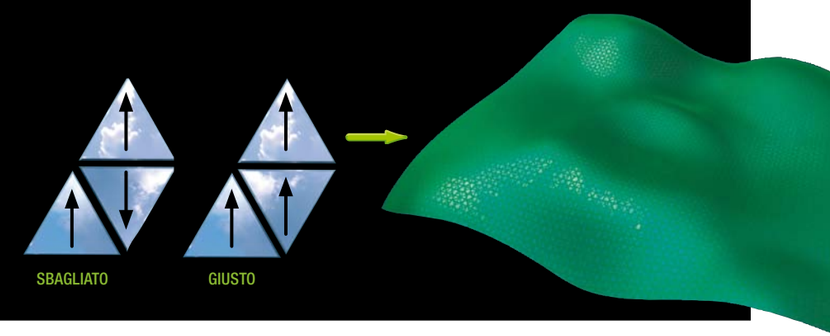
Dov'è l'errore? Cercando i punti deboli nell'ap-

Fare la media

Lo spazio-tempo può assumere un gran numero di forme possibili. Secondo la teoria quantistica, la forma che osserviamo con più probabilità è la media pesata di tutte queste possibilità. Nel ricostruire le forme unendo triangoli, gli studiosi pesano ogni forma secondo il numero di triangoli necessari per comporla. Per garantire che la media corrisponda proprio a quanto osserviamo, i triangoli devono seguire alcune regole: in particolare devono avere una propria freccia del tempo.







proccio euclideo, abbiamo trovato l'idea fondamentale, l'ingrediente assolutamente necessario per la riuscita della ricetta: l'universo deve incorporare quello che i fisici chiamano causalità. Ciò significa che lo spazio-tempo vuoto ha una struttura che permette di distinguere senza ambiguità tra causa ed effetto. La causalità è parte integrante delle teorie classiche della relatività speciale e generale.

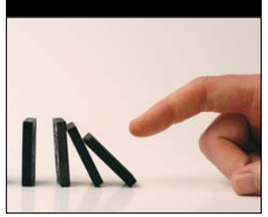
La gravità quantistica euclidea non ha una nozione di causalità. Il termine «euclideo» indica che lo spazio e il tempo sono trattati nello stesso modo. Gli universi che partecipano alla sovrapposizione euclidea hanno quattro direzioni spaziali, invece che una per il tempo e tre per lo spazio. Poiché gli universi euclidei non hanno una nozione di tempo ben definita, non hanno una struttura che disponga gli eventi in un ordine specifico; nel vocabolario degli abitanti di questi universi le parole «causa» o «effetto» non esisterebbero. Hawking e altri sostenitori di questo approccio hanno affermato che «il tempo è immaginario», sia in senso matematico sia nel senso corrente. Speravano che la causalità emergesse su larga scala a partire da fluttuazioni quantistiche microscopiche che, individualmente, non contengono alcuna struttura causale. Ma le simulazioni al computer hanno deluso questa speranza.

Invece di ignorare la causalità nell'assemblaggio dei singoli universi sperando che essa ricompaia in virtù dell'intelligenza collettiva della sovrapposizione, abbiamo deciso di incorporare la struttura causale a uno stadio molto precedente. Il termine tecnico per indicare il nostro metodo è «triangolazione dinamica causale». In questo metodo, si assegna a ogni simplesso una freccia del tempo che va dal passato al futuro. Poi si applica una regola di unione causale: due simplessi devono essere uniti in modo che le loro frecce puntino nella stessa direzione. I simplessi devono condividere una nozione di tempo, che si dispieghi rigidamente nella direzione delle frecce e non rimanga mai immobile, né torni indietro. Lo spazio mantiene la sua forma complessiva via via che il tempo avanza e non può frammentarsi in parti disconnesse o creare tunnel spazio-temporali.

Dopo aver formulato questa strategia nel 1998, abbiamo dimostrato in modelli assai semplificati che le regole di adesione causale conducono a una conformazione a larga scala diversa da quella della gravità quantistica euclidea. Per quanto incoraggiante, ciò non equivaleva a dimostrare che queste regole fossero sufficienti a generare un universo stabile quadridimensionale. Ecco perché nel 2004, mentre il computer stava per fornirci il primo calcolo di una sovrapposizione estesa di simplessi a quattro dimensioni, trattenevamo il fiato. Davvero lo spazio-tempo si comportava a grandi distanze come un oggetto quadridimensionale esteso e non come una palla accartocciata o un polimero?

CHE COS' È LA CAUSALITÀ?

La causalità è il principio secondo cui gli eventi si verificano in una specifica sequenza di causa ed effetto, invece che in un caotico disordine. Nell'approccio degli autori alla gravità quantistica, la distinzione tra causa ed effetto è intrinseca della natura e non una proprietà derivata.



Jean-Francois Podevin; Imageshop/Corbis (*domino*)

Immaginate la nostra euforia quando il numero di dimensioni è risultato uguale a 4 (più precisamente, 4,02 ± 0,1). Per la prima volta, qualcuno aveva ottenuto la dimensionalità osservata a partire da principi primi. In quel momento, la reintroduzione della causalità nei modelli gravitazionali quantistici era l'unico rimedio conosciuto per l'instabilità delle geometrie sovrapposte dello spazio-tempo.

Lo spazio-tempo a larga scala

Questa simulazione è stata la prima di una lunga serie con cui abbiamo tentato di estrarre le proprietà fisiche e geometriche dello spazio-tempo quantistico dalle simulazioni al computer. Il passo successivo è stato lo studio della forma dello spazio-tempo a lunghe distanze e la verifica che questa forma fosse in accordo con la realtà, cioè con le previsioni della relatività generale. Si tratta di un test assai ambizioso nei modelli non perturbativi di gravità quantistica, in cui non si ipotizza alcuna forma particolare per lo spazio-tempo. È un test tanto impegnativo che la maggior parte degli approcci alla gravità quantistica – compresa la teoria delle stringhe, salvo casi speciali – non sono stati sufficientemente avanzati da superarlo.

Abbiamo capito subito che per il funzionamento del nostro modello dovevamo includere una costante cosmologica, una sostanza invisibile e immateriale contenuta nello spazio anche in completa assenza di altre forme di materia ed energia. Ed è una buona notizia, perché i cosmologi hanno individuato prove di questa energia. Inoltre, lo spazio-tempo emergente ha una geometria che i fisici chiamano «geometria di de Sitter», che è proprio la soluzione delle equazioni di Einstein in un universo che contenga soltanto la costante cosmologica. È davvero sorprendente che, assemblando blocchi fondamentali microscopici in modo sostanzialmente aleatorio, senza tenere conto di alcuna simmetria o struttura geometrica privilegiata, si ottenga uno spazio-tempo che, a larga scala, ha la forma altamente simmetrica dell'universo di de Sitter.

L'emergere dinamico di un universo a quattro dimensioni con la forma fisica corretta a partire da principi primi è il risultato principale del nostro approccio. Resta da stabilire, in ricerche ancora in corso, se questo notevole risultato si possa capire in termini di interazioni di «atomi» fondamentali ancora da definire.

Dopo esserci convinti che il nostro modello di gravità quantistica superava un gran numero di test classici, ci siamo dedicati a un altro tipo di esperimenti, per indagare la struttura propriamente quantistica dello spazio-tempo che la teoria classica di Einstein non riesce a riprodurre. Una delle simulazioni che abbiamo realizzato è un processo di diffusione che, descrivendolo con un'analogia, equivale a lasciar cadere una goccia d'inchiostro

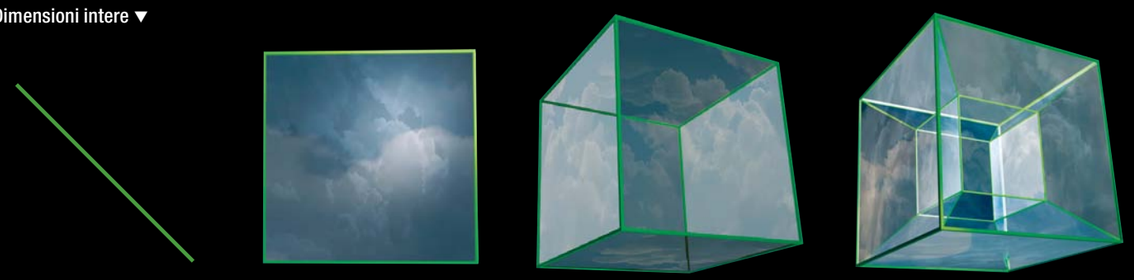
GLI AUTORI

JAN AMBJØRN, JERZY JURKIEWICZ e RENATE LOLL hanno sviluppato il loro approccio alla gravità quantistica nel 1998. Ambjørn è membro dell'Accademia reale danese ed è professore al Niels Bohr Institute di Copenhagen e all'Università di Utrecht, in Olanda. Jurkiewicz dirige il Dipartimento di teoria dei sistemi complessi all'Istituto di fisica dell'Università Jagellonica di Cracovia. Tra i vari ruoli che ha ricoperto in passato, ha insegnato al Niels Bohr Institute di Copenhagen. Loll è professore all'Università di Utrecht, dove dirige uno dei maggiori gruppi di ricerca europei sulla gravità quantistica. In precedenza ha lavorato al Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik di Golm, in Germania, dove ha ricevuto una Heisenberg Fellowship.

Nuove dimensioni dello spazio

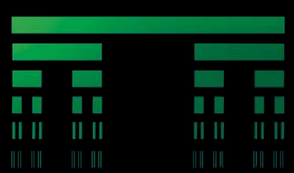
Nella vita di tutti i giorni il numero delle dimensioni si riferisce al numero minimo di misurazioni necessarie per specificare la posizione di un oggetto, come la latitudine, la longitudine e l'altitudine. Questa definizione implica che lo spazio è omogeneo, e obbedisce alle leggi della fisica classica. Ma che cosa accadrebbe se non fosse così? Che cosa succerebbe se la sua forma fosse determinata da un processo quantistico in cui le nozioni quotidiane non si possono dare per scontate? Per questi casi, fisici e matematici devono sviluppare nozioni dimensionali più sofisticate. Il numero di dimensioni necessarie non deve più essere intero, come nel caso dei frattali, strutture che hanno le stesso aspetto a tutte le scale.

Dimensioni intere ▼



1 dimensione — 2 dimensioni — 3 dimensioni — 4 dimensioni

Dimensioni frattali ▼



Insieme di Cantor
Questo frattale è una retta spezzettata. Secondo la definizione di Hausdorff (*si veda sotto*) questo frattale ha dimensione 0,6309.

Triangolo di Sierpinski
Questo frattale è un triangolo da cui sono stati eliminati triangoli sempre più piccoli: è una figura intermedia tra una linea a una dimensione e una superficie bidimensionale.
La dimensione di Hausdorff è 1,5850.

Spugna di Menger
È un cubo da cui sono stati eliminati cubi sempre più piccoli. Questo frattale è una superficie che ricopre parzialmente un volume. La sua dimensione di Hausdorff è 2,7268, simile a quella del cervello umano.

Definizioni generalizzate di dimensioni

Dimensione di Hausdorff ▼
Formulata dal matematico tedesco Felix Hausdorff, questa definizione si basa sul modo in cui il volume V di una regione dipende dalla sua dimensione lineare. Per lo spazio ordinario tridimensionale, V è proporzionale a r^3. L'esponente dà il numero delle dimensioni. Il termine «volume» si riferisce anche ad altre misure della grandezza totale, come l'area. Per il triangolo di Sierpinski, V è proporzionale a $r^{1,5850}$: la figura non copre completamente un'area.

Dimensione spettrale ▼
Questa definizione descrive come gli oggetti si diffondono in un mezzo in funzione del tempo, per esempio una goccia d'inchiostro in un recipiente d'acqua o una malattia in una popolazione. Ogni molecola d'acqua o individuo di una popolazione ha un certo numero di prossimi vicini, che determina il tasso di diffusione dell'inchiostro o della malattia. In un mezzo tridimensionale, una nuvola di inchiostro cresce nel tempo con la potenza 3/2. Nel triangolo di Sierpinski, l'inchiostro deve percolare attraverso una forma frastagliata, dunque si diffonde più lentamente, come una potenza del tempo elevata all'esponente 0,6826, che corrisponde a una dimensione spettrale di 1,3652.

Applicare le definizioni

In generale, metodi diversi con cui calcolare il numero di dimensioni danno risultati diversi, poiché investigano proprietà diverse della geometria. Per alcune figure geometriche, il numero di dimensioni non è fissato. Per esempio la diffusione potrebbe essere una funzione più complicata rispetto al tempo elevato a una data potenza.
Le simulazioni della gravità quantistica riguardano la dimensione spettrale. Esse suppongono di far cadere un minuscolo oggetto in un componente elementare dello spazio-tempo quantistico. Da lì, l'oggetto si muove in modo aleatorio. Il numero totale di blocchi elementari visitati durante un dato periodo di tempo rivela la dimensione spettrale.

Jean-Francois Podevin

nella sovrapposizione degli universi per osservare come si diffonda e venga dispersa dalle fluttuazioni quantistiche. Misurare la dimensione della nuvola d'inchiostro dopo un certo tempo ci permette di determinare il numero di dimensioni dello spazio (*si veda il box nella pagina a fronte*).

Il risultato è stupefacente: il numero di dimensioni dipende dalla scala. In altre parole, se lasciamo procedere la diffusione per un tempo breve, lo spazio-tempo sembra avere un numero di dimensioni diverso rispetto a simulazioni più lunghe. Anche chi si specializza in gravità quantistica può difficilmente immaginare che lo spazio-tempo cambi progressivamente di dimensione a seconda della risoluzione del microscopio. Evidentemente un oggetto piccolo percepisce lo spazio-tempo in un modo radicalmente diverso da un oggetto grande. Per quell'oggetto, l'universo somiglia a una struttura frattale. Un frattale è uno strano tipo di spazio in cui il concetto di estensione semplicemente non esiste. Un frattale è autosimile, cioè ha lo stesso aspetto a tutte le scale. Quindi non si può misurare con un righello o un qualunque altro oggetto di grandezza caratteristica da usare come metro.

Che cosa vuol dire «piccolo»? Fino a circa 10^{-34} metri, l'universo quantistico a larga scala è descritto dalla classica geometria di de Sitter a quattro dimensioni, nonostante le fluttuazioni quantistiche siano sempre più significative. È straordinario che l'approssimazione classica rimanga valida fino a distanze tanto piccole. Tutto questo ha conseguenze importanti per l'universo sia nel suo stadio primordiale sia nel futuro più lontano. In entrambi i casi, l'universo è praticamente vuoto. All'inizio le fluttuazioni quantistiche gravitazionali erano tanto grandi che la materia difficilmente poteva manifestarsi; era una piccolissima zattera sballottata da un oceano irrequieto. Vista la rapida espansione dell'universo, fra miliardi di anni la materia sarà tanto diluita da essere ininfluente, o quasi. Il nostro metodo potrebbe spiegare la forma dello spazio in entrambi i casi.

A scale ancora più piccole, le fluttuazioni quantistiche dello spazio-tempo diventano tanto forti da compromettere la nozione classica e intuitiva di geometria. Il numero di dimensioni, dal valore classico di quattro, precipita a circa due. Tuttavia, secondo le nostre conoscenze, lo spazio-tempo è ancora continuo e non ha nessun tunnel spazio-temporale. Non si tratta di un'irregolare e turbolenta schiuma spazio-temporale, come immaginavano il fisico John Wheeler e molti altri. La geometria dello spazio-tempo obbedisce a regole non standard e non classiche, ma il concetto di distanza si applica comunque. Ora stiamo indagando scale ancora inferiori. Una possibilità è che l'universo divenga autosimile e abbia lo stesso aspetto a tutte le scale sotto una certa soglia. In questo caso, lo spazio-tempo non consisterebbe in stringhe e atomi spazio-temporali, ma in una regione di ripetitività infinita: la struttura osservata appena al di sotto della soglia semplicemente ripeterebbe se stessa a ogni scala più piccola, fino all'infinito.

È difficile immaginare come i fisici possano creare un universo quantistico realistico con meno ingredienti e strumenti tecnici di noi. Occorrono ancora molti test ed esperimenti per capire, per esempio, come si comporta la materia nell'universo e come la materia a sua volta influenza la forma complessiva dell'universo. Il «santo graal», come per ogni teoria della gravità quantistica, è la capacità di prevedere conseguenze osservabili determinate dalla struttura quantistica microscopica. Sarà l'ultimo esame per decidere se il nostro modello è la teoria corretta della gravità quantistica. ■

➡ Letture

Deriving Dimension. Cho A., in «Physical Review Focus», 28 settembre 2004. **focus.aps.org/story/v14/st13.**

Planckian Birth of a Quantum de Sitter Universe. Ambjørn J., Görlich A., Jurkiewicz J. e Loll R., in «Physical Review Letters», Vol. 100, n. 091304, 7 marzo 2008. Anteprima su **arxiv.org/abs/0712.2485.**

The Complete Idiot's Guide to String Theory. Musser G., Alpha, 2008.

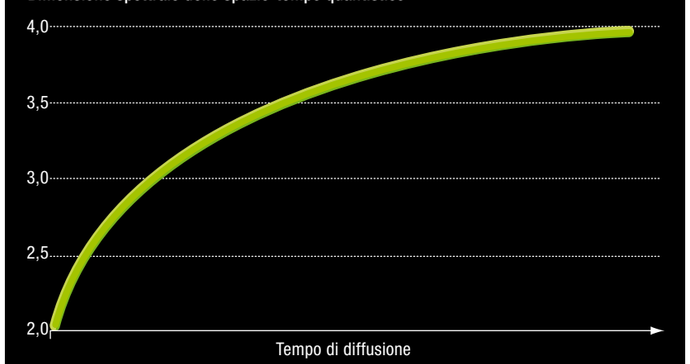
The Emergence of Spacetime, or, Quantum Gravity on Your Desktop. Loll R., in «Classical and Quantum Gravity», Vol. 25, n. 11, n. 114006, 7 giugno 2008. **arxiv.org/abs/0711.0273**

La pagina web di Renate Loll: **www.phys.uu.nl/~loll/.**

Zoom nello spazio-tempo

Dai calcoli degli autori, la dimensione spettrale dello spazio-tempo passa da quattro (a grandi scale) a due (a piccole scale) e lo spazio-tempo si scompone da una forma omogenea e continua a una frattale e contorta. I fisici stanno ancora cercando di capire se questa conclusione significa che in definitiva lo spazio-tempo è composto da «atomi» localizzati o da strutture intricate che hanno ben poco a che vedere con il nostro usuale concetto di geometria.

Dimensione spettrale dello spazio-tempo quantistico



Lo spazio-tempo quantistico si può immaginare come un fiocco di neve: a piccole scale è un frattale…

… ma a grandi scale è tridimensionale e omogeneo.

Lucy Reading-Ikkanda; Noaa/Photo Researchers, Inc. (*fiocco di neve*); Terry W. Eggers/Corbis (*cumulo di neve*)

Tracce di un LONTANO PASSATO

Il DNA offre un quadro sempre più chiaro del viaggio multimillenario di Homo sapiens dall'Africa alla punta estrema del Sud America

di Gary Stix

Illustrazione: Sean Mccabe; fonti: Daniel Sambraus (*cranio*), Pascal Goetgheluck (*cranio Neanderthal*), Biophoto Associates (*cromosoma*) PhotoResearchers, Inc.

IN SINTESI

- Gli scienziati ricostruiscono il percorso delle migrazioni umane servendosi di ossa, manufatti e DNA. Gli antichi reperti, tuttavia, sono spesso difficili da trovare.
- Il DNA degli esseri umani contemporanei può essere confrontato per determinare per quanto tempo una popolazione indigena ha vissuto in una certa regione.
- Gli studi più recenti analizzano interi genomi, generando mappe degli spostamenti umani attraverso gran parte del mondo, descrivendo inoltre in che modo i geni delle persone si sono adattati ai cambiamenti dell'alimentazione, del clima e delle malattie.

Una società di proprietà del fratellastro di Osama Bin Laden ha annunciato l'anno scorso di voler costruire un ponte attraverso il Bab el Mandeb, o Porta delle Lacrime, lo stretto che congiunge il Mar Rosso all'Oceano Indiano. Se quest'ambiziosa opera sarà realizzata, le schiere di pellegrini africani che percorreranno uno dei ponti più lunghi del mondo per arrivare alla Mecca cammineranno alcune centinaia di metri sopra il probabile itinerario del viaggio più memorabile della storia umana. Tra 50.000 e 60.000 anni fa, infatti, un piccolo gruppo di africani attraversò lo stretto a bordo di minuscole imbarcazioni, senza fare più ritorno.

La ragione per cui lasciarono la propria patria nell'Africa orientale non è chiara. Forse il clima era cambiato, forse le riserve di molluschi, un tempo abbondanti, si erano esaurite. Ma qualche certezza c'è. Quei primi emigranti portarono con sé tratti fisici e comportamentali – un cervello di grandi dimensioni e il linguaggio – che caratterizzano gli esseri umani moderni. Dai loro bivacchi in quello che oggi è lo Yemen, partirono per un viaggio che durò migliaia di anni, attraversando continenti e istmi, fino alla Terra del Fuoco, la punta estrema del Sud America.

Gli scienziati sono riusciti a farsi un'idea di queste migrazioni grazie al ritrovamento di ossa fossili o punte di freccia. Ma i resti lasciati dai nostri antenati sono spesso troppo scarni per darci un quadro completo di questa storia remota. Negli ultimi vent'anni, la genetica delle popolazioni ha iniziato a riempire le lacune nei dati paleoantropologici ricostruendo le tracce genetiche delle primissime migrazioni degli esseri umani moderni.

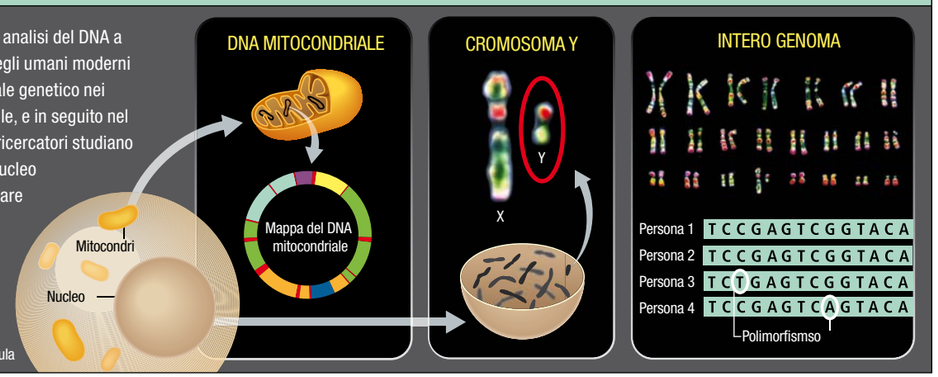
Quasi tutto il nostro DNA – il 99,9 per cento dei tre miliardi di «lettere», o nucleotidi, che costituiscono il genoma umano – è identico da persona a persona, ma in quell'ultimo 0,1 per cento si nascondono differenze significative. Un confronto tra africani orientali e nativi americani, per esempio, può rivelare indizi fondamentali sulle origini umane e sull'inesorabile progredire delle colonizzazioni da un continente all'altro. Fino a pochi anni fa, il DNA trasmesso esclusivamente per via paterna o per via materna è servito ai genetisti quale equivalente delle impronte fossili. Le ultimissime ricerche permettono di aggiustare il tiro, allargando il campo di indagine da pochi, isolati frammenti di DNA a centinaia di migliaia di nucleotidi disseminati nell'intero genoma.

È così diventato possibile realizzare mappe di migrazione globale di una risoluzione senza precedenti, alcune delle quali sono state pubblicate soltanto negli ultimi mesi. Queste ricerche offrono ulteriore sostegno alla tesi dell'origine africana degli esseri umani moderni, mostrando che il continente è stato un serbatoio di diversità genetica che a poco a poco si è diffusa al resto del mondo: un albero genealogico che ha alle sue radici con il popolo San in Africa e ha gli indios sudamericani e gli abitanti delle isole del Pacifico nei rami più giovani.

Lo studio della variabilità genetica umana risale alla prima guerra mondiale, quando due medici che lavoravano a Salonicco scoprirono che i soldati di stanza nella città greca presentavano un'incidenza maggiore o minore di un certo gruppo sanguigno a seconda della nazionalità. A partire dagli anni cinquanta, Luigi Luca Cavalli-Sforza iniziò a formalizzare lo studio delle differenze ge-

Indagini genetiche

Vent'anni fa, le prime analisi del DNA a caccia delle origini degli umani moderni iniziarono dal materiale genetico nei mitocondri delle cellule, e in seguito nel cromosoma Y. Oggi i ricercatori studiano l'intero genoma del nucleo cellulare per confrontare le differenze, o polimorfismi, dei singoli nucleotidi, le «lettere» dell'alfabeto del DNA.



netiche tra popolazioni esaminando la diversità delle proteine dei gruppi sanguigni. Le variazioni delle proteine rispecchiano le differenze dei geni che le codificano.

Poi, nel 1987, Rebecca Cann e Allan Wilson, dell'Università della California a Berkeley, pubblicarono uno studio rivoluzionario basato sull'analisi del DNA contenuto nei mitocondri, gli organelli cellulari addetti alla produzione di energia, che sono trasmessi per linea materna. I due ricercatori riferivano che gli esseri umani delle varie popolazioni discendevano tutti da un'unica femmina vissuta in Africa circa 200.000 anni fa: un risultato che portò immediatamente la stampa a celebrare la scoperta dell'«Eva mitocondriale». (Nonostante l'allusione biblica, quell'Eva africana non fu la prima donna: la sua discendenza, tuttavia, è l'unica a essere sopravvissuta).

A proposito di Eva

Il ritmo rapido e relativamente prevedibile delle mutazioni mitocondriali «neutre» – né vantaggiose né dannose – fa sì che questi organelli funzionino come orologi molecolari. Contando le differenze nel numero di mutazioni (i ticchettii dell'orologio) tra due gruppi, o lignaggio, si può ricostruire un albero genealogico che riconduce a un progenitore comune: l'Eva mitocondriale o un'altra donna capostipite di un nuovo lignaggio. Il confronto tra le età dei lignaggi di regioni diverse permette di costruire una linea temporale delle migrazioni umane.

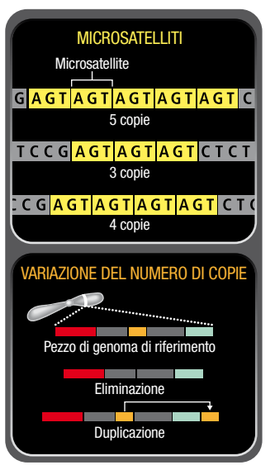
Dal 1987, la banca dati sulla diversità umana si è ingrandita, includendo il cromosoma Y, il cromosoma sessuale trasmesso solo dai padri ai figli maschi. Il DNA trasmesso per via patrilineare contiene molti più nucleotidi di quello mitocondriale (decine di milioni, in confronto ad appena 16.000), migliorando così la capacità di distinguere tra una popolazione e l'altra. L'analisi del DNA mitocondriale e di quello del cromosoma Y delle popolazioni umane ha fatto scoprire centinaia di marcatori genetici (i siti di DNA con mutazioni identificabili e specifiche di un particolare lignaggio).

La rotta seguita dagli esseri umani per spostarsi dall'Africa alle Americhe nel corso di decine di migliaia di anni può ora essere seguita sulla mappa come se i viaggiatori avessero seguito, sia pure con estrema lentezza, una serie di autostrade intercomunicanti. Le sigle alfanumeriche delle strade, per esempio A80, possono essere «tradotte» in marcatori genetici alfanumerici. Nel caso del cromosoma Y, per esempio, si attraversa il Bab el Mandeb sull'autostrada (il marcatore genetico) M168, che diventa M89 quando ci si dirige a nord attraverso la penisola araba. Imboccando la M9 a destra si va verso la Mesopotamia e oltre. Raggiunta un'area a nord dell'Hindu Kush, si gira a sinistra sulla M45. Arrivati in Siberia, si va a destra e si segue la M242 finché non attraversa l'istmo che porta in Alaska. Si prende la M3 e si prosegue verso il Sud America (*si veda la mappa nella pagina a fronte*).

Il DNA mitocondriale e il cromosoma Y sono potenti strumenti d'analisi. La National Geographic Society, la IBM e la Waitt Family Foundation hanno creato una collaborazione finanziata privatamente con 40 milioni di dollari fino al 2010, il cui impegno primario è l'uso di questi strumenti. Con il sostegno di dieci istituzioni accademiche regionali, il cosiddetto Genographic Project sta raccogliendo il DNA di circa 100.000 individui di popolazioni indigene in tutto in mondo. «Il nostro obiettivo principale sono i dettagli di come le persone hanno effettuato i viaggi», spiega Spencer Wells, che dirige il progetto. In un recente rapporto, i suoi ricercatori hanno riferito che i Khoisan dell'Africa meridionale sono rimasti geneticamente separati dagli altri africani per 100.000 anni. In un altro studio, hanno dimostrato che una parte del pool genico dei maschi libanesi può essere fatta risalire ai crociati cristiani e ai musulmani della penisola araba.

PIÙ MODI PER SEZIONARE UN GENOMA

Gli scienziati sono alla continua ricerca di marcatori genetici – sequenze caratteristiche di nucleotidi – che differiscono da una popolazione all'altra e che possono essere usati quando si confrontano interi genomi. I microsatelliti, brevi sequenze ripetitive di nucleotidi presenti su tutti i cromosomi (*sopra*), hanno fatto da marcatori per oltre un decennio. Un nuovo tipo di analisi sull'intero genoma cerca le variazioni del numero di copie: delezioni o duplicazioni fino a un milione di nucleotidi.



Jen Christiansen; Cnri/Photo Researchers, Inc. (*cromosoma*)

Nuovi strumenti

I genetisti hanno analizzato il DNA di molti individui che vivono lungo i percorsi migratori che hanno scoperto. Eppure a volte l'apparente certezza dei dati inganna. Chi studia le origini umane continua a preferire un fossile, che si può toccare con mano, a un albero genealogico. Il DNA non è come gli isotopi radioattivi usati per datare i fossili: il tasso di velocità delle mutazioni può variare da un segmento di DNA all'altro.

Ma i paleoantropologi sono in stallo. I resti fossili sono rari e troppo spesso incompleti. La primissima migrazione dall'Africa all'Australia si manifesta nel DNA mitocondriale e nel cromosoma Y (grazie agli abitanti delle Isole Andamane, tra gli altri), ma i reperti fisici lungo il percorso mancano ampiamente all'appello.

Alla penuria di pietre e ossa si risponde con più DNA, di qualsiasi provenienza. Per rafforzare la causa della genetica, sono stati studiati i microrganismi che hanno avuto un «passaggio» dagli esseri umani, esaminandone i geni alla ricerca di modelli analoghi di migrazione. Tra quegli «autostoppisti» si contano batteri, virus e persino pidocchi. Oltre ai microrganismi, il Progetto Genoma Umano e gli studi correlati per indagare su interi genomi hanno prodotto una serie di potenti strumenti che stanno aiutando a compensare le carenze dei metodi genetici. «È possibile osservare una grande varietà di siti nel genoma di molti individui e molte popolazioni, ottenendo così più potere statistico quando si tratta di verificare ipotesi diverse», afferma Tim Weaver, professore di antropologia all'Università della California a Davis.

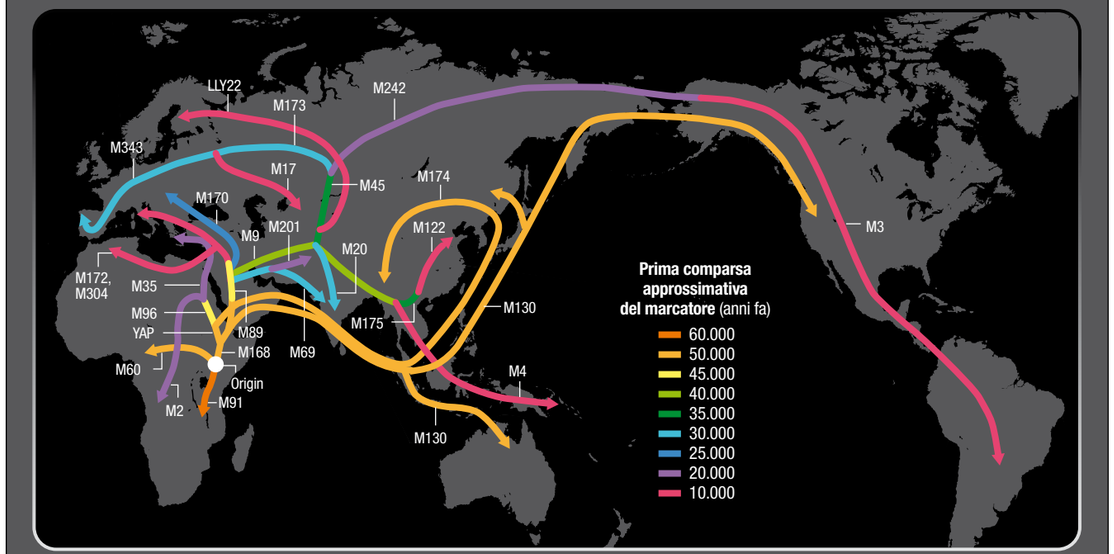
In questo decennio, i ricercatori hanno fatto importantissime scoperte grazie al confronto simultaneo di molte varianti, o polimorfismi, che punteggiano i tre miliardi di nucleotidi del genoma. I primi studi sull'intero genoma condotti all'inizio del decennio hanno analizzato le differenze tra popolazioni in brevi segmenti ripetitivi di DNA, noti come microsatelliti. Più di recente, la portata dell'indagine si è ulteriormente raffinata. In febbraio sono stati pubblicati due articoli – uno su «Science», l'altro su «Nature» – con i risultati delle indagini più vaste condotte finora sulla diversità umana. Entrambe hanno esaminato oltre 500.000 polimorfismi a singolo nucleotide (SNP) – la sosti-

AUTOSTOPPISTI

I microrganismi che vivono sulle persone, o all'interno del loro corpo, possono aiutare i ricercatori a confermare le scoperte sulle migrazioni umane. I geni di *Helicobacter pylori*, il batterio responsabile dell'ulcera peptica, endemico negli esseri umani, indicano che il microbo lasciò l'Africa 58.000 anni fa, insieme all'uomo. Una specifica linea evolutiva del microbo appare sia nelle popolazioni dell'Asia orientale sia nei nativi sudamericani, rafforzando così la tesi che i sudamericani siano arrivati originariamente dall'Asia.

I viaggi del cromosoma Y

I genetisti possono ricostruire il percorso delle antiche migrazioni esaminando i marcatori genetici nel cromosoma Y di maschi provenienti da regioni diverse. Ogni marcatore, come M168 o M89, identifica un lignaggio e il suo punto di origine. Costruendo un albero evolutivo basato sull'osservazione di molti individui con quei marcatori, i ricercatori possono determinare le età approssimative delle varie discendenze.



Jen Christiansen; fonti: National Geographic Maps; P. Hawtin/Photo Researchers, Inc. (*batteri*)

tuzione di un nucleotide con un altro in un punto specifico del DNA – presi dallo Human Genome Diversity Panel. Le linee cellulari derivano da circa 1000 individui di 51 popolazioni di ogni parte del mondo, e sono conservate dal Centro per lo studio del polimorfismo umano a Parigi.

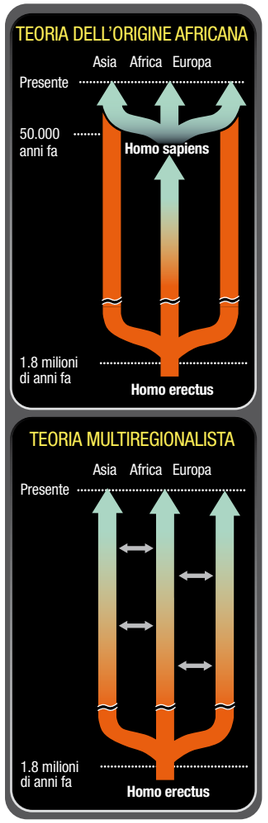
I due gruppi di ricerca hanno analizzato questa miniera di dati in vari modi. Hanno confrontato direttamente gli SNP tra popolazioni distinte, analizzando anche gli aplotipi, blocchi di DNA che contengono numerosi SNP che vengono ereditati intatti attraverso molte generazioni. Il gruppo che firma l'articolo su «Nature» ha inoltre esplorato una nuova tecnica per sondare la variazione umana, confrontando ripetizioni o delezioni di segmenti di DNA lunghi fino a un milione di nucleotidi nel genoma di un individuo, in sintonia con la generale tendenza a cercare un numero sempre più alto di marcatori nel genoma. «Qualsiasi pezzo singolo del genoma avrà una storia che non riflette necessariamente l'ascendenza del genoma nel suo insieme», dice Noah A. Rosenberg dell'Università del Michigan ad Ann Arbor e primo firmatario dell'articolo di «Nature». Ma osservando molte aree contemporaneamente, spiega, si può superare l'ostacolo: «Con migliaia di marcatori, possiamo determinare la storia complessiva delle migrazioni umane».

Rapporti di parentela

Osservare centinaia di migliaia di SNP ha permesso di chiarire le identità di singole popolazioni, verificando come parentele geneticamente prossime si siano disperse in lungo e in largo. L'ascendenza dei nativi sudamericani è stata ricondotta al popolo siberiano e ad altri popoli asiatici. Gli Han, il principale gruppo etnico cinese, hanno due popolazioni distinte, a nord e a sud. I beduini sono imparentati con gruppi europei, pakistani e mediorientali.

Questi risultati, che sono coerenti con precedenti ricerche di antropologia, archeologia, linguistica e biologia, hanno anche fornito un fondamento statistico più ampio alla tesi dell'origine africana dell'uomo moderno, rafforzando l'ipotesi che una piccola popolazione umana sia uscita dal continente e sia poi aumentata di dimensioni in una nuova patria finché un altro sottogruppo di «fondatori» se ne è staccato per trasferirsi altrove: un processo che si è ripetuto fino a colonizzare il mondo intero.

Lungo il cammino, questi gruppi emarginarono le popolazioni arcaiche – *Homo neanderthalensis* e *Homo erectus* – senza che avvenisse interfecondazione, o quasi. Il nuovo lavoro sul DNA indica che ogni volta che un gruppo più ristretto si staccò, portò con sé solo una sottoserie della diversità genetica originariamente presente nella popolazione africana. Così, via via che la distanza dall'Africa aumenta (e il tempo), la diversità diminuisce, offrendo un mezzo per seguire i movimenti delle popolazioni. Il genoma dei nativi americani, protagonisti delle ultime grandi migrazioni continentali, presenta molta meno varietà di quello degli africani.



TEORIE A CONFRONTO

La teoria dell'origine africana sostiene che gli esseri umani con tratti anatomici moderni lasciarono l'Africa tra 50.000 e 60.000 anni fa e popolarono il resto del mondo. Lungo il cammino, si sostituirono a ominidi più arcaici, come *Homo erectus*, che avevano lasciato l'Africa circa 1,8 milioni di anni fa.
La teoria del multiregionalismo afferma invece che le caratteristiche moderne non si sono evolute solo in Africa, ma anche da popolazioni arcaiche di ominidi in Asia e in Europa. A far sì che alla fine rimanesse un'unica specie sarebbe stata l'interfecondazione tra tutti questi gruppi (*frecce orizzontali*).

Molti scienziati ritengono che il peso delle prove, sostenute ora da grandi analisi statistiche come quelle citate, dia ai fautori della tesi dell'origine africana un chiaro vantaggio nell'annoso dibattito sulle origini umane (*si veda il box qui a fianco*).

Sono pochi gli scienziati che si schierano ancora a favore di una rigida interpretazione del multiregionalismo. Ma continuano a circolarne versioni modificate, soprattutto come tentativi di stabilire se *H. sapiens* rechi le firme genetiche dei nostri incontri con altri cugini ominidi. Negli ultimi anni Vinayak Eswaran, dell'Indian Institute of Technology, in collaborazione con Henry Harpending e Alan Rogers dell'Università dello Utah, ha condotto una serie di simulazioni che suggeriscono che gli umani moderni si siano ibridati in modo intensivo con specie arcaiche come *H. erectus*, dopo la migrazione dall'Africa. Il modello di Eswaran indica che l'80 per cento del genoma dell'essere umano moderno può essere stato soggetto, a un certo punto, agli effetti di questo tipo di ibridazione.

L'impronta genetica non è tanto visibile quanto ci si potrebbe aspettare se vi fosse stata ibridazione, tuttavia Harpending propone una spiegazione. Un gruppo di geni vantaggiosi portati dagli emigranti africani, forse quelli utili alla riproduzione, conferì un vantaggio selettivo che alla fine avrebbe cancellato la firma di alcuni geni arcaici. «Il risultato è che la popolazione sembra imparentata più strettamente con la popolazione [africana] fonte dei geni favoriti di quanto sia in realtà», afferma.

Siamo un po' neanderthaliani?

Eswaran e Harpending non sono i soli a suggerire accoppiamenti interspecie. Alcuni resti fossili di scheletro di *H. sapiens* presentano caratteristiche che ricordano ominidi precedenti, e anche i record genetici degli esseri umani contemporanei hanno alimentato le discussioni.

Secondo i diagrammi ad albero delle linee genetiche, alcune varianti geniche mostrano una «profonda ancestralità»: sono molto più antiche di quanto dovrebbero essere se gli esseri umani si fossero evoluti da un unico gruppo omogeneo non più di 200.000 anni fa, un indizio di possibile ibridazione. In uno studio del 2006, Bruce Lahn e colleghi dell'Università di Chicago hanno riferito che una versione del gene della microcefalina, coinvolto nel controllo della dimensione del cervello, contiene un aplotipo che può essere stato trasmesso durante un incontro con i Neanderthal 40.000 anni fa.

Una risposta più definitiva potrebbe essere prossima. Il Neanderthal Genome Project – una collaborazione tra il Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie di Lipsia e 454 Life Sciences, una società di sequenziamento del Connecticut – dovrebbe completare entro la fine dell'anno una prima bozza di circa il 70 per cento delle sequenze di DNA ricavate da ossa di Neanderthal di 40.000 anni fa provenienti da uno scavo in Croazia. I risultati dovrebbero essere pubblicati sei mesi dopo.

Finora il progetto non ha rivelato alcun segno di schema genetico che suggerisca un trasferimento di DNA tra le due specie. «Non ne vediamo alcuna prova, ma non possiamo neanche escluderlo», spiega Svante Pääbo, il professore del Max-Planck-Institut responsabile del progetto. Una precedente pubblicazione del suo gruppo su un'indagine su un milione di nucleotidi, una minuscola frazione dell'intero genoma, suggeriva che potrebbero essersi verificati alcuni scambi genici, ma in seguito si scoprì che era stato un falso segnale causato dalla contaminazione del campione. I ricercatori non si sono ancora imbattuti nella variante di microcefalina citata da Lahn.

Maneggiare un campione, o persino respirarci sopra, è un grosso ostacolo al lavoro con il DNA antico: alcuni archeologi si dedicano agli scavi indossando ingombranti tute asettiche come quelle usate nella produzione di microprocessori. Dopo quel passo falso, il laboratorio di Pääbo ha modificato le procedure usate nella «camera pulita» del Max-Planck-Institut. I ricercatori collocano dei contrassegni costituiti da quattro nucleotidi di DNA sintetico all'inizio di ogni frammento di materiale genetico neanderthaliano, e ogni frammento che esce dalla macchina sequenziatrice è sottoposto a un controllo di identità molecolare.

Capire la composizione genetica del cugino più stretto della linea umana – stime derivate da studi precedenti mostrano che i due genomi sono simili al 99,5 per cento – potrebbe offrire la migliore dimostrazione pratica di genomica comparata che si sia avuta finora, permettendo l'identificazione di siti nel genoma umano dove l'ibridazione ha seguito il suo corso e dove la selezione naturale ha favorito certi tratti. «Se si è interessati all'evoluzione umana, i Neanderthal sono un'occasione unica», afferma Pääbo. «Sono i nostri parenti più stretti, e abbiamo accesso al loro genoma, anche se è tecnicamente complicato. Per la maggior parte di altri gruppi umani ancestrali, ciò non sarà possibile».

I SEGRETI DEI COGNOMI

La documentazione genetica sulla storia umana può essere rafforzata semplicemente sfogliando un elenco del telefono alla ricerca di determinati cognomi. Un gruppo di ricerca coordinato da Mark A. Jobling, dell'Università di Leicester ha riferito l'anno scorso che gli uomini residenti nell'Inghilterra nord-occidentale i cui cognomi erano usati in quella zona già prima del Seicento avevano alti livelli di ascendenza scandinava nei loro cromosomi Y, retaggio di un'eredità vichinga. In un altro articolo, Jobling ha suggerito che durante le indagini su un crimine, questo sistema potrebbe essere usato per collegare i risultati delle prove del DNA a un gruppo di cognomi, in modo da restringere il numero dei sospetti.

Nuovi studi, ancora non pubblicati, rivelano che il cromosoma Y dei Neanderthal è diverso da quello umano. «Nessun essere umano ha un cromosoma Y simile a quello dei Neanderthal», osserva Pääbo, il che rispecchia risultati precedenti secondo cui anche il DNA mitocondriale umano e quello dei Neanderthal sono facilmente distinguibili. Nel novembre scorso Pääbo e il suo team hanno riferito una somiglianza tra le due specie. Resti di Neanderthal scoperti in Spagna avevano una versione del gene *FOXP2* identica a quella del gene umano che partecipa allo sviluppo del discorso e del linguaggio. Anche in questo caso, ci si è chiesti se il gene possa essere il risultato dell'ibridazione, benché l'eventualità di una contaminazione non sia da escludere.

Come ci siamo adattati?

Mentre si continua a sequenziare il DNA da frammenti di vecchie ossa per capire se gli esseri umani si siano accoppiati con altre specie del genere *Homo*, qualcuno ricorre ad analisi sull'intero genoma per vedere quali tratti geneticamente con-

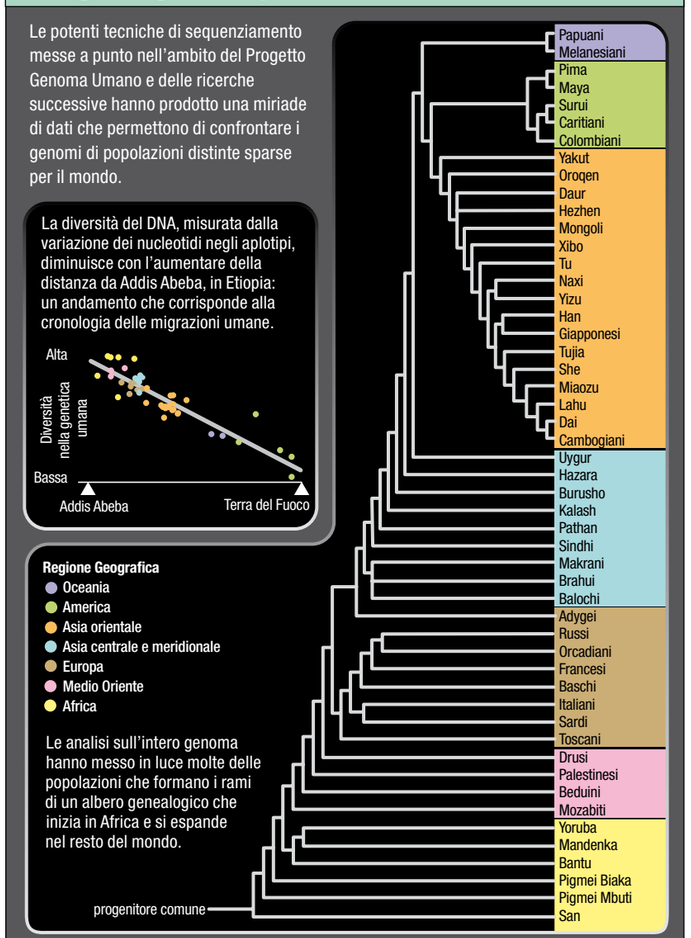
LA CONTAMINAZIONE DA DNA umano complica l'analisi genetica dei Neanderthal. Gli operai che lavorano nello scavo di El Sidron, in Spagna, hanno iniziato a indossare tute asettiche per proteggere i campioni appena estratti.

Jay H. Matternes (*Neanderta*); El Sidron Research Team (*scavi*)

Jen Christiansen

In ogni angolo del pianeta

Le potenti tecniche di sequenziamento messe a punto nell'ambito del Progetto Genoma Umano e delle ricerche successive hanno prodotto una miriade di dati che permettono di confrontare i genomi di popolazioni distinte sparse per il mondo.



Una mappa genomica del mondo, realizzata dai ricercatori dell'Università del Michigan ad Ann Arbor, mostra che la diversità genetica si riduce al di fuori dell'Africa. Ogni blocchetto colorato corrisponde a un aplotipo comune. L'Africa ha più blocchi rispetto agli altri continenti, e alcuni di essi corrispondono ad aplotipi che non sono stati trovati altrove.

Martin Soave, Università del Michigan ad Ann Arbor (*mappa*); Jen Christiansen (*grafico e albero genetico*); fonte: *Worldwide Human Relationships Inferred from Genome-wide Patterns of Variation*, di Jun Z. Li e altri, in «Science», Vol. 319; 2008

trollati siano cambiati per deriva genetica (mutazioni casuali) e selezione naturale via via che gli emigranti si adattavano ai nuovi habitat.

Uno studio pubblicato in febbraio su «Nature» ha illustrato le conseguenze del declino della diversità genetica con il progressivo allontanamento di *Homo sapiens* dall'Africa. Confrontando oltre 40.000 SNP in un gruppo di 20 americani di origine europea e 15 di origine africana, si è scoperto che gli euroamericani avevano una percentuale più alta di modificazioni genetiche dannose, alcune potenzialmente legate a malattie, rispetto agli afroamericani. La ricerca mostra ciò Carlos Bustamante ha definito una «eco genetica di popolazione» dei colonizzatori dell'Europa. Con l'espansione demografica, la scarsa diversità genetica della piccola popolazione europea iniziale permise a una serie di mutazioni dannose di diffondersi ampiamente, e a nuove mutazioni dannose di emergere.

Gli studi sull'intero genoma stanno anche cominciando a fornire una panoramica sul modo in cui la selezione naturale ha aiutato gli emigranti ad adattarsi ai nuovi ambienti. Negli ultimi due anni, una serie di studi ha cercato le mutazioni genetiche avvenute dopo che gli esseri umani lasciarono l'Africa o divennero agricoltori e che appaiono vantaggiose per sopravvivere nelle nuove circostanze. I ricercatori hanno sfruttato l'International HapMap, un catalogo degli aplotipi e dei 3,9 milioni di SNP in essi contenuti, provenienti da nordamericani con ascendenti nell'Europa nordoccidentale e da abitanti di Nigeria, Cina e Giappone.

Così diversi, così uguali

Uno studio, di cui Harpending è coautore, ha mostrato che negli ultimi 40.000 anni la velocità di cambiamento del DNA, e dunque il ritmo dell'evoluzione, ha accelerato. Un altro, condotto da Pardis Sabeti e colleghi del Broad Institute di Cambridge, in Massachusetts, ha evidenziato che la selezione è ancora all'opera in centinaia di regioni del genoma, tra cui aree che controllano la resistenza alle malattie e lo sviluppo del colore della pelle e dei follicoli piliferi, che regolano il sudore. Questi risultati implicano che le popolazioni umane stanno continuando ad adattarsi alle differenze regionali nell'esposizione al sole, nell'alimentazione e nei patogeni incontrate dopo aver abbandonato la loro patria africana ancestrale. E che anche gli africani si sono evoluti in armonia con i cambiamenti del loro habitat.

Uno degli studi più recenti, guidato da Lluis Quintana-Murci dell'Institut Pasteur di Parigi, ha mostrato che 580 geni, tra cui quelli che hanno un ruolo nel diabete, nell'obesità e nell'ipertensione, sono attualmente sottoposti a selezione in modo diverso nell'ambito delle popolazioni HapMap, il che forse spiega le differenze geografiche nella distribuzione delle malattie e offre indizi per nuovi obiettivi nello sviluppo di farmaci.

A volte l'analisi dei processi che sono alla base della diversità umana si muove al di là delle dimensioni dei follicoli piliferi e della capacità di digerire il latte. Il dibattito su che cosa siano le razze e le etnie può facilmente rientrare nel quadro. Che cosa comporta che una variante genica legata alla cognizione ricorra con più frequenza negli europei che negli africani? Una migliore comprensione della genetica da parte del pubblico – il fatto che un singolo gene non agisce come un interruttore che accende o spegne l'intelligenza – può evitare congetture sbagliate.

Capire la genetica farà sì che parole come «asiatico» o «cinese» siano sostituite da classificazioni più sottili, basate sulle differenze nella composizione genetica ancestrale scoperte nelle analisi del genoma, come la distinzione tra i gruppi Han meridionali e settentrionali. «Non ci sono razze», dice Quintana-Murci. «Ciò che vediamo [dal punto di vista della genetica] sono gradienti geografici. Non ci sono differenze nette tra europei e asiatici. Dall'Irlanda al Giappone, non ci sono soglie inequivocabili dove qualcosa cambia completamente».

Il viaggio attraverso la storia evolutiva descritta dalla genomica comparata è ancora agli inizi. Nel frattempo l'esigenza di dati, algoritmi e computer più potenti non ha limiti. La costruzione di database più estesi – un consorzio internazionale ha annunciato a gennaio di voler sequenziare 1000 genomi di varie popolazioni regionali – consentirà ai ricercatori di produrre simulazioni ancora più realistiche di modelli alternativi dell'evoluzione umana e valutare le probabilità di ciascuno di questi, fino a produrre lo scenario migliore mai realizzato di chi siamo e da dove veniamo. ■

Può prestarmi il suo DNA?

Per poter delineare un quadro sempre più approfondito delle origini umane, i genetisti hanno bisogno di raccogliere più campioni dalle popolazioni indigene di tutto il mondo. «Occorre una maggiore risoluzione nei dati», afferma Marcus Feldman della Stanford University, coautore di una recente analisi comparativa sul genoma. «Se domani mi dessero un milione di dollari, io troverei 100 popolazioni in più delle 5000 che ci occorrono».

Un altro ostacolo potrebbe essere rappresentato dalla necessità di superare le resistenze a questo tipo di indagini. Nel 1991 Luigi Luca Cavalli-Sforza e colleghi delinearono lo Human Genome Diversity Project, che avrebbe prodotto un deposito di cellule provenienti da 10.000 individui appartenenti a 400 popolazioni di tutto il mondo. Il progetto però naufragò a causa della resistenza da parte dei gruppi indigeni a fornire campioni: un gruppo aborigeno australiano lo definì un «Progetto Vampiro». Malgrado dettagliate procedure di consenso informato, alcuni gruppi temevano che i loro campioni sarebbero stati usati per sviluppare e brevettare nuovi farmaci, cosa che reputavano come una forma di biopirateria.

Il progetto non ricevette mai il sostegno dei National Institutes of Health, ma una sua versione più modesta ha preso il via in questo decennio, basata sulle linee cellulari provenienti da oltre 1000 individui che vari genetisti di popolazione avevano raccolto ciascuno per suo conto. Questa raccolta, conosciuta come Human Genome Diversity Cell Lines è conservata presso il Centro per lo studio del polimorfismo umano a Parigi. Finora ha fornito un database contenente informazioni su 51 popolazioni, informazioni che sono state usate in diversi studi, tra cui le due grandi ricerche transgenomiche pubblicate in febbraio su «Nature» e «Science» di cui si parla in queste pagine.

Come lo Human Genome Diversity Project, anche il più recente Genographic Project, che intende raccogliere campioni di DNA da 100.000 membri di popolazioni indigene, sta incontrando opposizione. Il progetto ha protocolli dettagliati che assicurano il consenso informato nella raccolta dei campioni, e non intende usare i dati per ricerche a carattere medico. Tuttavia deve ancora superare alcune resistenze, soprattutto da parte di gruppi di nativi americani.

A prescindere dalle assicurazioni fornite, alcuni gruppi potrebbero essere comunque riluttanti a fornire un tampone dell'interno della guancia, un campione di sangue o una provetta di saliva. I ricercatori potrebbero non raggiungere mai l'obiettivo di ottenere una serie davvero esauriente di campioni che rispecchi pienamente tutte le sottili gradazioni della diversità genetica umana.

RACCOLTA DI DNA per il Genographic Project nel Ciad. Spencer Wells, che dirige il progetto, preleva un tampone dall'interno della guancia di un uomo.

David Evans/National Geographic

➥ Letture

All'alba dell'uomo: viaggio alle origini della nostra specie. Wade N., Cairo Editore, Milano, 2007.

Deep Ancestry: Inside the Genographic Project. Wells S., National Geographic, 2007.

Human Origins: What Bones and Genomes Tell Us about Ourselves. DeSalle R. e Tattersall I., Texas A&MPress, 2007.

New Developments in the Genetic Evidence for Modern Humans. Weaver T.D. e Roseman C.C., in «Evolutionary Anthropology», Vol. 17, pp. 69-80, 22 febbraio 2008.

Giocare con i gruppi semplici

Una nuova famiglia di giochi ispirati al cubo di Rubik permette di familiarizzare con oggetti matematici bizzarri e affascinanti

IN SINTESI

- Per riuscire a risolvere il cubo di Rubik è necessario scoprire brevi sequenze di mosse che permettono di raggiungere obiettivi parziali.
- Questa strategia funziona tanto bene che gli autori hanno cercato di ideare giochi la cui soluzione richiedesse nuove strategie.
- Basando il loro lavoro sulla teoria matematica dei gruppi, ben illustrata dal cubo di Rubik, gli autori hanno inventato tre nuovi giochi che mettono alla prova gli amanti di questo tipo di rompicapi con le complessità dei cosiddetti «gruppi semplici sporadici».

di Igor Kriz e Paul Siegel

Milioni di persone si sono appassionate cubo di Rubik, un rompicapo affascinante che ha conquistato il mondo negli anni ottanta. Se per qualche motivo vi è sfuggito, il cubo in questione è un oggetto di plastica composto da 27 piccoli cubi. Ogni spigolo del cubo di Rubik è composto da tre cubetti e ciascuna delle sei facce presenta un determinato colore: in genere blu, giallo, arancione, rosso, verde e bianco.

Il cubo è «apparentemente» composto dai cubetti, ma in questo caso le apparenze ingannano. Un meccanismo ingegnoso, inventato e brevettato nel 1975 dall'insegnante ungherese Ernö Rubik (e nel 1976 in modo indipendente dall'ingegnere giapponese Terutoshi Ishige) permette a ognuna delle sei facce di ruotare intorno al proprio centro (*si veda il box a p. 60*). Basta ruotare quattro o cinque facce in modo casuale per avere un cubo che solo un esperto può rimettere in ordine. Lo scopo di questo rompicapo è riportare un cubo mescolato arbitrariamente al suo stato originale, ovvero ad avere un unico colore per faccia. In altre parole, l'obiettivo è «risolvere» il cubo.

Il cubo di Rubik, i poliedri di Rubik e tutte le numerose imitazioni non autorizzate apparse in seguito sono detti «giochi di permutazione» perché si basano su mosse che cambiano posizione ai pezzi che compongono il gioco (nel caso del cubo di Rubik i cubetti che lo compongono), cioè permutano la posizione dei pezzi. Lo scopo è sempre lo stesso: riportare i pezzi in una posizione predeterminata, di solito la loro configurazione iniziale. I giochi di permutazione sono strettamente imparentati con un ente matematico chiamato «gruppo di permutazioni», cioè l'insieme di tutte le sequenze di mosse consentite che portano a disposizioni diverse degli oggetti del gioco.

In matematica un gruppo può essere considerato come una generalizzazione dell'aritmetica ordinaria. Gli interi positivi e negativi, 0, ±1, ±2 e così via, formano un gruppo rispetto all'operazione di addizione. Ma i gruppi possono essere composti da molti altri tipi di oggetti – le rotazioni e le riflessioni di oggetti fisici, vari tipi di permutazioni che si applicano a insiemi di lettere, i numeri che formano le matrici quadrate e così via – purché il gruppo comprenda un'operazione per combinare tra loro gli oggetti che ne fanno parte in modo che anche queste combinazioni siano elementi del gruppo.

Oltre all'interesse dei matematici, la teoria dei gruppi ha importanti applicazioni in altri campi come la cristallografia, la fisica delle particelle elementari, la teoria delle stringhe e le telecomunicazioni. Quindi è importante dal punto vista scientifico, oltre a essere stimolante, che studenti e scienziati acquisiscano familiarità con il comportamento dei gruppi. Per molte persone scoprire una soluzione del cubo di Rubik si è rivelato un ottimo modo per avere un'idea di come si combinano tra loro gli elementi di certi gruppi astratti.

Ma una volta raggiunto questo livello di padronanza spesso le persone capiscono che le strategie impiegate sono efficaci anche per risolvere anche altri giochi di permutazione ispirati al cubo. E quando questo accade, i giochi perdono il loro fascino. Almeno questa è stata la nostra esperienza con il cubo di Rubik. Ma sapevamo anche che c'erano buone ragioni matematiche per la nostra delusione. Tutti i rompicapi analoghi al cubo di Rubik rappresentano gruppi di uno stesso tipo generale, e quindi si prestano allo stesso tipo di soluzione. Ma questi gruppi sono lontani dall'esaurire la ricchezza matematica del concetto di gruppo.

A fini didattici, quello che volevamo era un modo divertente per sviluppare l'intuizione relativa a gruppi diversi da quelli rappresentati dal cubo. E come amanti dei rompicapi desideravamo una nuova famiglia di giochi le cui soluzioni richiedessero una strategia sostanzialmente diversa da quella del cubo di Rubik e dei suoi parenti.

Così abbiamo fatto il passo più naturale che si possa immaginare: abbiamo creato tre nuovi giochi basati su alcuni gruppi noti come «gruppi semplici sporadici», le cui proprietà sono notevoli e poco conosciute ai non specialisti. Fortunatamente, l'esperienza dei nostri colleghi insegna che chiunque sia in grado di imparare a risolvere il cubo di Rubik può imparare a conoscere altrettanto compiutamente i gruppi semplici sporadici grazie ai nostri rompicapi. Inoltre questi giochi danno soddisfazione, nel senso che vanno affrontati con metodi diversi rispetto a quelli impiegati per il cubo di Rubik, e riteniamo che siano anche molto divertenti. I lettori che vogliono cimentarsi subito possono scaricarli dal sito Internet di «Le Scienze» (*si veda il box a p. 63*).

Matt Collins

NUMERI ANIMATI si esibiscono in un balletto mentre si ridispongono seguendo le regole di una mossa per uno dei tre giochi, chiamato M_{12}, creati dagli autori.

GLI AUTORI

Cortesia Igor Kriz (*Kriz*); cortesia Paul Siegel (*Siegel*)

IGOR KRIZ (*sinistra*) è professore di matematica all'Università del Michigan ad Ann Arbor, dove si interessa di topologia algebrica e fisica matematica. Ha conseguito il dottorato in matematica all'Univerzita Karlova di Praga. PAUL SIEGEL si è occupato degli argomenti di questo articolo quando era laureando all'Università del Michigan. Ora sta conseguendo un dottorato in matematica alla Pennsylvania State University.

I giochi e i loro gruppi

Per risolvere i nuovi giochi è utile capire qualcosa dei gruppi semplici sporadici, su cui si basano, e in che cosa sono diversi rispetto al gruppo rappresentato dal cubo di Rubik: il «gruppo di Rubik». I gruppi possono avere un numero di elementi finito o infinito. Ovviamente il gruppo additivo degli interi che abbiamo menzionato prima contiene infiniti elementi. Ma anche il numero di elementi del gruppo di Rubik è finito, sebbene l'insieme di tutte le possibili sequenze di mosse del cubo sia infinito. Il motivo è che se due sequenze di mosse portano da una stessa disposizione iniziale dei cubetti a una stessa disposizione finale, sono considerate equivalenti. Nel cubo di Rubik il numero di configurazioni distinte è astronomico – circa 4×10^{19}, per essere precisi, 43.252.003.274.489.856.000 – e quindi il numero di elementi, cioè di combinazioni distinte di mosse nel gruppo rappresentato dal cubo, è gigantesco ma finito.

Anche se lo «spazio» delle mosse che si ottiene è enorme, non è difficile trovare una soluzione del cubo seguendo alcune idee generali. Servono carta, penna e un cubo di Rubik, possibilmente ordinato. Il nostro obiettivo è duplice: ottenere un modo pratico per registrare le mosse (*si veda il box qui accanto*), scoprire varie e brevi sequenze di mosse da annotare per ottenere scopi specifici, cioè scambiare tra loro certe coppie di cubetti ai vertici o sugli spigoli (*si veda il box nella pagina a fronte*). L'idea è combinare sistematicamente le sequenze per risolvere un cubo mescolato in modo casuale.

Come risultato si ha che questo approccio sistematico, iniziato procedendo per tentativi, quasi sempre porta a sequenze utili che danno sufficiente flessibilità per risolvere il cubo. Usando un linguaggio più appropriato, il motivo è che i componenti algebrici basilari del gruppo di Rubik sono i cosiddetti «gruppi simmetrici», ovvero i gruppi di tutte le possibili permutazioni di un dato numero di oggetti, e i «gruppi alterni», parenti stretti dei gruppi simmetrici. Ciascun gruppo alterno contiene metà degli elementi del corrispondente gruppo simmetrico, quindi il gruppo simmetrico S_3 contiene tutte le 3! ($1 \times 2 \times 3$), cioè sei, possibili permutazioni di tre oggetti (*si veda il box a p. 62*); il suo parente stretto, cioè il gruppo alterno A_3, ha tre elementi. Tra i gruppi simmetrici correlati con il gruppo di Rubik ci sono il gruppo simmetrico S_8 (che contiene tutti gli 8!, ovvero 40.320, modi di rimescolare gli otto cubetti ai vertici) e il gruppo simmetrico S_{12} (che contiene tutti i 12!, ovvero 479.001.600, modi di rimescolare i 12 cubetti lungo gli spigoli).

«Atomi» di simmetria

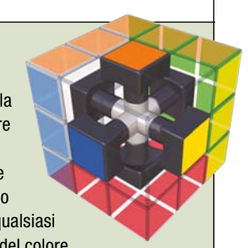
Anche i nostri sono giochi di permutazione, ma si basano su un «gruppo semplice sporadico». Per capire che cos'è un gruppo semplice sporadico cominciamo dal concetto di sottogruppo.

Supponiamo di poter ruotare solo la faccia blu e quella gialla del cubo di Rubik. Con questa restrizione non è possibile spostare il cubetto di spigolo verde e bianco. Quindi il numero di sequenze distinte di mosse possibili è inferiore al numero di elementi dell'intero gruppo di Rubik. Se ogni combinazione di mosse all'interno di un sottoinsieme di un gruppo è a sua volta una mossa del gruppo, il sottoinsieme è detto sottogruppo. Proseguendo verso il concetto di gruppo semplice le cose si fanno un po' tecniche; per ora basta dire che un gruppo semplice è un gruppo che non contiene sottogruppi «normali non banali» (*si veda il box a p. 62*).

Codificare il cubo di Rubik

La soluzione dei giochi creati dagli autori si basa su tecniche sviluppate per lo studio dei gruppi matematici. Una tecnica importante della teoria dei gruppi consiste nello specificare un metodo univoco per trascrivere gli elementi del gruppo e come si combinano.

TRASCRIVERE

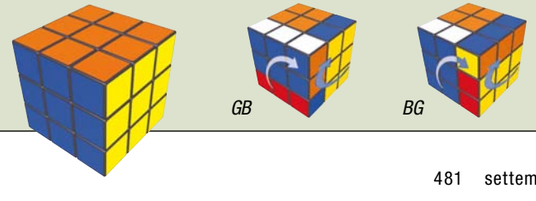


Il cubo di Rubik rappresenta un gruppo i cui elementi sono le «mosse», le rotazioni possibili per ogni faccia del cubo, e in cui la regola per combinarne due è un'operazione che si può chiamare «e poi»: «Applica questa rotazione *e poi* applica quest'altra». Il meccanismo nell'illustrazione (*a destra*) mostra che, comunque si mescola il cubo, i cubetti al centro delle facce non si spostano (tranne per il fatto che ruotano intorno al proprio centro). Così qualsiasi mossa per risolvere il cubo si può indicare con la prima lettera del colore del cubetto centrale – *B*lu, *V*erde, *A*rancione, *R*osso, *G*iallo e *W* per *white*, bianco – più un modo per indicare l'ampiezza della rotazione. Da sola, una lettera indica che la faccia corrispondente si deve ruotare di 90 gradi in senso orario guardando la faccia dall'esterno del cubo (mosse *G* e *B* nel diagramma qui sotto). Un esponente indica altri tipi di rotazioni. B^2 ruota la faccia blu di 180 gradi; G^{-1} ruota la faccia gialla di 90° in senso antiorario.

L'orientamento del cubo si può specificare con i colori dei tre cubetti centrali visibili, in senso orario, iniziando dal cubetto centrale della faccia superiore; nelle immagini qui sotto, per esempio, l'orientamento è sempre *AGB*.

SUGGERIMENTO: L'ORDINE È IMPORTANTE

La successione delle mosse è essenziale per risolvere il cubo, e quindi la notazione deve registrarne le differenze. Le mosse composte *GB* e *BG* non portano una data disposizione iniziale dei cubetti alla stessa configurazione finale.



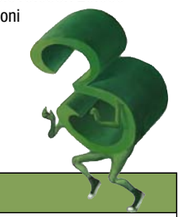
George Retseck (*cubi*)

Il termine «semplice», per come viene usato in teoria dei gruppi, è forse uno dei termini più impropri della storia della matematica. Tra i gruppi semplici sono emerse alcune delle strutture più complesse che i matematici conoscano. Ma sono semplici nel senso che sono i componenti fondamentali, gli «atomi», della teoria dei gruppi. Si può dire che i gruppi semplici siano anche come i numeri primi, cioè i numeri divisibili solo per loro stessi e per 1 (2, 3, 5, 7, 11 e così via). Ogni gruppo finito si può scomporre in gruppi semplici, come ogni numero intero si può fattorizzare in numeri primi.

Tutti i gruppi semplici finiti sono stati identificati e classificati. Scoperti tra il 1860 e il 1980, sono stati classificati soprattutto tra la fine degli anni quaranta e i primi anni ottanta (con correzioni recenti), grazie al contributo di centinaia di matematici. I resoconti delle scoperte dei gruppi semplici e la dimostrazione che l'elenco finale è completo comprendono più di 10.000 pagine distribuite tra circa 500 articoli pubblicati in numerose riviste matematiche. I matematici sono ancora al lavoro per trovare una versione più semplice della dimostrazione, che aiuti a capire meglio i gruppi semplici. Ma la dimostrazione che abbiamo già ci dice che ci sono 18 famiglie di gruppi semplici finiti (ogni famiglia è un insieme infinito di gruppi di un certo tipo) e 26 gruppi sporadici, ciascuno dei quali è un ente matematico a se stante. Non ce ne sono altri.

TRE GIOCHI, TANTE MOSSE

- Il gioco M_{12} (basato sul gruppo di Mathieu M_{12}): 95.040 permutazioni
- Il gioco M_{24} (basato sul gruppo di Mathieu M_{24}): 244.823.040 permutazioni
- Il gioco Dotto (basato sul gruppo di Conway Co_0): 8.315.553.613.086.720.000 permutazioni



Rompicapi semplici sporadici

Abbiamo costruito tre giochi di permutazione basati su gruppi semplici sporadici noti come M_{12}, M_{24} e Co_1. Ma le permutazioni che rappresentano i gruppi semplici sporadici sono molto più restrittive riguardo al modo di permutare gli oggetti rispetto a quelle dei gruppi simmetrici. Quindi nei nostri giochi molte configurazioni sono impossibili, indipendentemente dal numero di mosse.

Come abbiamo già detto, la strategia che funziona per risolvere il cubo e altri giochi basati sui gruppi simmetrici non funziona per i nostri nuovi rompicapi. Ma si possono sviluppare altre strategie anche conoscendo pochi dettagli sui gruppi.

Il più semplice dei nostri giochi è M_{12}, basato sull'omonimo gruppo semplice sporadico. Il gruppo M_{12} è uno dei primi cinque gruppi semplici sporadici scoperti. Questi cinque gruppi sono detti gruppi di Mathieu, in onore del matematico francese Emile Mathieu che li identificò negli anni sessanta dell'Ottocento. Il giocatore ha di fronte una sequenza opportunamente mescolata dei numeri da 1 a 12, allineati su una riga. Sono permessi solo due tipi di mosse, ma ciascuno si può applicare un numero qualsiasi di volte e in qualsiasi ordine (*si veda il box a p. 63*). L'obiettivo è riordinare la sequenza nell'ordine numerico usuale (1, 2 ... 12).

A chi accetta la sfida diamo solo un suggerimento. Nel gioco (e nel gruppo M_{12}) è possibile portare cinque numeri qualunque in cinque posizioni qualsiasi tra le dodici della riga. Fatto questo, tutti gli altri numeri vanno al loro posto. Il gioco è risolto perché il gruppo M_{12} contiene $12 \times 11 \times 10 \times 9 \times 8$, cioè 95.040, permutazioni, esattamente il numero di modi con cui scegliere cinque dei 12 numeri e disporli in altrettanti punti della sequenza. (Il primo può occupare una qualsiasi delle 12 posizioni, il secondo una qualsiasi delle 11 posizioni rimanenti, e così via.) Il fatto che l'intera permutazione è determinata fissando le posizioni di cinque numeri implica che non ha senso cercare una successione di mosse che sposti solo pochi numeri. A parte la mossa nulla,

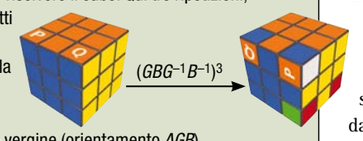
Decodificare il cubo di Rubik

In genere i giochi di permutazione classici come il cubo di Rubik, in cui l'obiettivo è di riportare i pezzi in una configurazione base, si possono risolvere seguendo una strategia articolata in due fasi.

FASE 1

Procedendo per tentativi si sceglie una breve sequenza casuale di mosse, come $GBG^{-1}B^{-1}$ (la notazione è spiegata nel box della pagina a fronte).

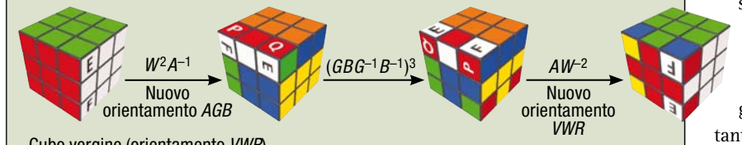
Si ripete la sequenza casuale varie volte. Spesso porterà a una disposizione in cui si sono mossi solo pochi cubetti: uno strumento utile per risolvere il cubo. Qui tre ripetizioni, cioè $(GBG^{-1}B^{-1})^3$, scambiano due coppie di cubetti ai vertici: le coppie al confine delle facce blu e arancione (cubetti indicati con *P* e *Q*, *a destra*) e la coppia al confine tra le facce gialla e rossa.



Cubo vergine (orientamento *AGB*)

FASE 2

Si modificano e generalizzano le mosse utili trovate. Per esempio, per scambiare tra loro i due cubetti d'angolo tra le facce rossa e bianca (indicati con *E* e *F* sul cubo «vergine» mostrato sotto nell'orientamento *VWR*), cerchiamo una mossa che «prepara» la nostra «mossa utile». La breve sequenza di preparazione W^2A^{-1} sposta i cubetti d'angolo *E* ed *F* nelle posizioni *P* e *Q* (per chiarezza le facce del cubo sono state riorientate da *VWR* a *AGB*). Ora si può applicare la mossa utile $(GBG^{-1}B^{-1})^3$, disfare la sequenza di preparazione applicando le mosse in ordine inverso, AW^{-2}, e ripristinare l'orientamento iniziale del cubo, *VWR*. L'effetto è stato di scambiare tra loro i cubetti d'angolo *E* ed *F* (*sotto*).



Cubo vergine (orientamento *VWR*)

Si può trovare una simile sequenza di preparazione per spostare qualsiasi coppia di cubetti d'angolo nelle posizioni scambiate da $(GBG^{-1}B^{-1})^3$. In questo modo si può costruire una mossa specifica per scambiare qualsiasi coppia di cubetti d'angolo. Procedendo in modo analogo con altre sequenze casuali si ottiene una flessibilità sufficiente a risolvere il cubo e qualsiasi altro gioco di permutazione classico.

George Retseck (*cubi*)

Che cos'è un gruppo semplice sporadico?

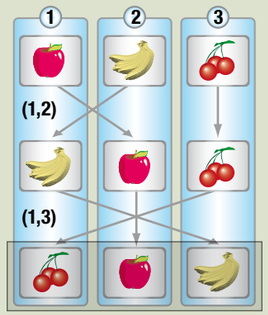
Tutti e tre i nuovi giochi rappresentano gruppi semplici sporadici di permutazioni. Per capire che cosa vuol dire questa frase servono alcune informazioni preliminari.

NOTAZIONE, NOTAZIONE, NOTAZIONE

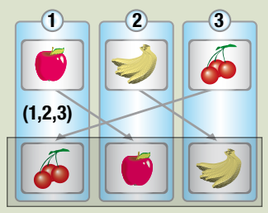
Il gruppo «simmetrico» S_n è il gruppo di tutte le possibili permutazioni, o riordinamenti, di n oggetti o simboli disposti su una riga. Il gruppo simmetrico S_3, per esempio, è l'insieme delle sei permutazioni distinte che danno luogo alle sei possibili disposizioni di tre oggetti diversi. Un gruppo di permutazioni comprende sempre la permutazione «fittizia», o identità, indicata con (1), che non fa nulla.

La permutazione (1,2) scambia tra loro gli oggetti presenti nella prima e nella seconda posizione (*a destra*).

La permutazione (1,3) scambia tra loro gli oggetti nella prima e terza posizione. L'applicazione di (1,3) al risultato di (1,2), che si indica con (1,2) • (1,3), dà la disposizione raffigurata qui a destra.



Combinare queste due permutazioni equivale ad applicare un'unica permutazione che si scrive (1,2,3). Questa notazione è un modo conciso per indicare di spostare nella seconda posizione l'oggetto presente nella prima, nella terza posizione quello nella seconda, e nella prima quello nella terza.



TUTTO È «MOLTIPLICAZIONE»

La tabella relativa alle sei permutazioni di tre oggetti mostra come si combinano tutte e 36 le coppie di elementi di S_3. La mossa nulla (1) si comporta come il numero 1 in una normale tabellina. Si noti che ogni «prodotto» dato dalla tabella è uguale a una delle sei permutazioni di partenza (*caselle bianche*), una proprietà di tutti i gruppi, detta chiusura.

		Poi si applica questa permutazione					
	∘ («e poi»)	(1)	(1,2,3)	(1,3,2)	(1,2)	(1,3)	(2,3)
Prima si applica questa permutazione	(1)	(1)	(1,2,3)	(1,3,2)	(1,2)	(1,3)	(2,3)
	(1,2,3)	(1,2,3)	(1,3,2)	(1)	(2,3)	(1,2)	(1,3)
	(1,3,2)	(1,3,2)	(1)	(1,2,3)	(1,3)	(2,3)	(1,2)
	(1,2)	(1,2)	(1,3)	(2,3)	(1)	(1,2,3)	(1,3,2)
	(1,3)	(1,3)	(2,3)	(1,2)	(1,3,2)	(1)	(1,2,3)
	(2,3)	(2,3)	(1,2)	(1,3)	(1,2,3)	(1,3,2)	(1)

Quello che succede in un sottogruppo rimane nel sottogruppo

Ogni possibile prodotto delle tre permutazioni nella regione arancione della tabella è uguale a una delle stesse tre permutazioni. A causa di questa proprietà di chiusura, anche queste tre permutazioni formano un gruppo: si dice che è un sottogruppo del gruppo S_3.

Si può sempre disfare

Per ogni permutazione della colonna più a sinistra della tabella, uno dei suoi prodotti è uguale a (1), cioè alla «permutazione identità». La permutazione alla sommità della stessa colonna dove si trova (1) è detta inversa della permutazione di partenza. In poche parole, ogni permutazione g ha un'inversa, indicata con g^{-1}. Per esempio l'inversa di (1,2,3), che si scrive $(1,2,3)^{-1}$, è (1,3,2), perché (1,2,3) • (1,3,2) è uguale a (1); (1,2) è l'inversa di sé stessa, cioè $(1,2)^{-1}$, perché, come mostra la tabella, (1,2) • (1,2) = (1).

METTERE TUTTO INSIEME

Un gruppo semplice è un gruppo senza sottogruppi «normali non banali». Ogni gruppo ha almeno due sottogruppi: se stesso e il sottogruppo il cui unico elemento è (1); un sottogruppo non banale è qualsiasi altro sottogruppo possibile.

E allora, che cosa vuol dire normale?

Scegliamo una qualsiasi permutazione nella tabella moltiplicativa, diciamo (1,2), e «moltiplichiamola» per qualsiasi permutazione del sottogruppo colorato in arancione, per esempio (1,2,3).

(1,2) • (1,2,3) = (1,3)

Moltiplichiamo il risultato per l'inverso della prima permutazione, in questo caso (1,2):

(1,3) • (1,2) = (1,3,2)

In breve: (1,2) • (1,2,3) • $(1,2)^{-1}$ = (1,3,2)

Se il risultato di ogni prodotto triplo definito in questo modo è all'interno del sottogruppo, il sottogruppo si dice normale. Qui il prodotto finale (1,3,2) si trova effettivamente nel sottogruppo arancione.

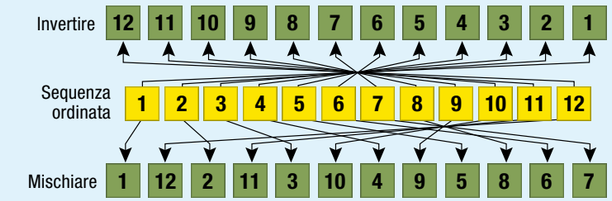
D'accordo, è semplice. E sporadico?

La maggior parte dei gruppi semplici è stata classificata in famiglie di gruppi semplici con un numero infinito di elementi. Ma 26 di loro sono casi originali che non appartengono a queste famiglie e non hanno molto in comune tra di loro. Per non usare il termine «vari ed eventuali», i matematici li chiamano sporadici.

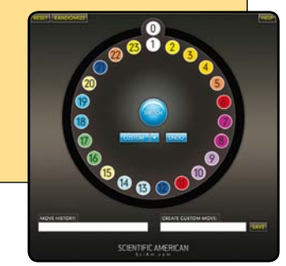
Johnny Johnson

Che cosa troverete in rete

Il gioco di Mathieu M_{12}, che rappresenta il gruppo semplice sporadico M_{12}, è stato progettato dagli autori in modo da poterci giocare on line. Il gioco inizia con una disposizione casuale dei numeri che vanno da 1 a 12. L'obiettivo è riordinarli usando una sequenza di mosse di due tipi, ciascuna delle quali si può eseguire cliccando su un pulsante. Il diagramma mostra l'effetto di ognuna delle mosse sulla sequenza ordinata.



Un secondo gioco di Mathieu, M_{24}, rappresenta il gruppo semplice sporadico M_{24}. Nella disposizione non mescolata i numeri da 1 a 23 sono disposti in senso orario su un cerchio, e lo 0 è posto fuori dal cerchio, a ore 12. Come per il gioco M_{12}, l'obiettivo è ripristinare l'ordine originale a partire da un mescolamento casuale. Anche il gioco M_{24} prevede due tipi di mosse. Una mossa ruota il cerchio di una «tacca», mandando nella posizione 2 il numero che si trova nella posizione 1, nella 3 il numero nella 2 e così via. Il numero nella posizione 23 è mandato nella posizione 1, e il numero fuori dal cerchio non si muove. La seconda mossa scambia le coppie di numeri con lo stesso colore.



che lascia le configurazioni come sono, le altre devono lasciare al loro posto meno di cinque numeri. In altre parole, ogni successione non banale di mosse deve spostare almeno otto dei 12 numeri.

Riservato ai coraggiosi

Il secondo gioco, M_{24}, è composto da 23 numeri disposti in cerchio più un ventiquattresimo numero fuori dal cerchio. Come nel gioco M_{12}, sono permessi solo due tipi di mosse (*si veda il box in questa pagina*). Il gruppo di permutazioni generato dalle due mosse di M_{24} è il gruppo di Mathieu M_{24}. Come M_{12}, anche M_{24} è «5-transitivo»: con opportune combinazioni delle due mosse si può manipolare la configurazione in modo che cinque dei 24 numeri siano disposti in cinque delle 24 posizioni. A causa della transitività il nostro suggerimento per risolvere M_{12} aiuta anche a risolvere M_{24}: trovate mosse che riportano i numeri da 1 a 5 al loro posto senza spostare i numeri che si trovano già al loro posto.

Ma questa volta il gioco non è finito. Il gruppo M_{24} ha 24 × 23 × 22 × 21 × 20 × 48 elementi, vale a dire 244.823.040; quindi anche dopo che i numeri da 1 a 5 sono tornati al loro posto, gli altri 19 numeri possono ancora essere distribuiti attorno al cerchio in 48 modi diversi.

Dotto, il nostro ultimo gioco, si basa sul gruppo di Conway Co_0, pubblicato nel 1968 dal matematico John H. Conway della Princeton University. Co_0 contiene il gruppo semplice sporadico Co_1 e ha il doppio degli elementi di Co_1. Conway è troppo modesto per intitolarsi il gruppo Co_0, e quindi lo chiama «.0» (punto, in inglese *dot*, e 0, da qui il nome).

Siamo costretti a riservare i dettagli di Dotto alla nostra trattazione su Internet. Però osserviamo che sia il gioco sia il gruppo su cui si basa hanno proprietà matematiche affascinanti. Il rompicapo è imparentato con il reticolo di Leech, un insieme di «punti», o elenchi ordinati di numeri, in uno spazio a 24 dimensioni. Si sa che tra tutti i modi per disporre sfere nello spazio a 24 dimensioni in modo che i centri delle «sfere» si trovino sui punti di un reticolo, la disposizione basata sul reticolo di Leech è la più compatta.

Neonati e mostri

Solo quattro gruppi semplici sporadici hanno più elementi di Co_1: il gruppo di Janko J_4, il gruppo di Fischer Fi_{24}', il Baby Mostro B e il Mostro M. Fedele al suo nome, il Mostro è il più grande di tutti, con circa 8×10^{53} elementi. Fu costruito nel 1980 da Robert L. Griess, Jr., dell'Università del Michigan ad Ann Arbor come gruppo delle trasformazioni di una complessa struttura matematica in uno spazio a 196.884 dimensioni.

Non abbiamo provato a costruire giochi basati su altri gruppi semplici sporadici, anche se alcuni saranno senz'altro possibili. Ma progettare un gioco basato sul Mostro sarebbe un'impresa matematica ardua. Il motivo è che non si sa se il Mostro sia il gruppo delle permutazioni di qualche oggetto abbastanza piccolo da poter essere visualizzato, anche se, secondo una congettura, è il gruppo delle permutazioni di un certo spazio curvo a 24 dimensioni. Se si riuscisse a progettare un «rompicapo del Mostro» saremmo vicini alla dimostrazione di questa affascinante congettura. ■

Ryan Reid

Letture

I cubisti giocherellano con i cubetti del Cubo Magico e i cubologi li risolvono. Hofstadter D.R., in «Le Scienze» n. 153, maggio 1981.

L'enorme teorema. Gorenstein D., in «Le Scienze» n. 210, febbraio 1986.

Sphere Packings, Lattices and Groups. Conway J.H. e Sloane N.J.A., Springer-Verlag, 1999.

Per un elenco dei gruppi sporadici: **Sporadic Group.** Weisstein E.W., in *MathWorld-A Wolfram Web Resource*. **http://mathworld.wolfram.com/SporadicGroup.html.**

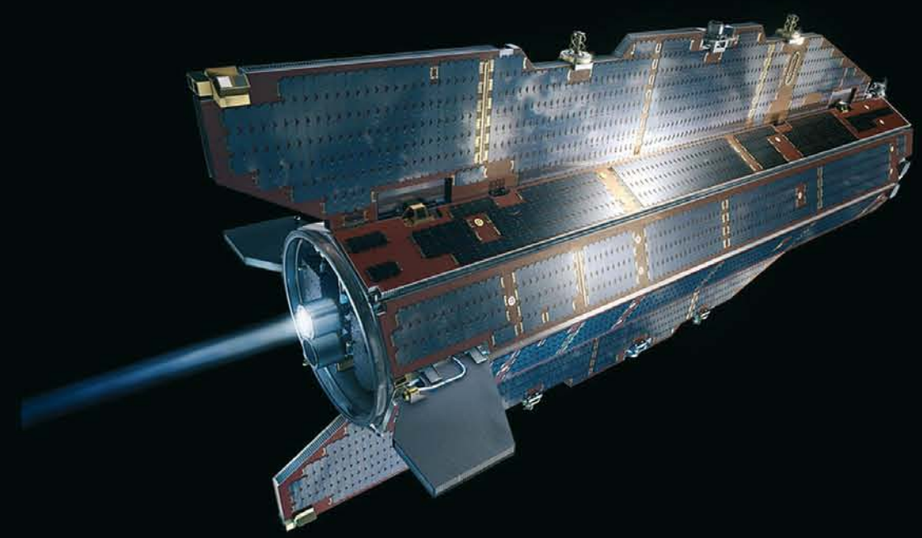
lescienze.it

Tutti e tre i giochi, M_{12}, M_{24} e Dotto, sono disponibili sul nostro sito: www.lescienze.it (con M_{12} e M_{24} si gioca direttamente in Rete e con qualunque computer; Dotto si deve scaricare e si può giocare solo con un PC.)

GOCE: la misura della Terra

Volando a una quota insolitamente bassa, un aerodinamico satellite europeo realizzerà la prima mappa ad altissima risoluzione del campo gravitazionale terrestre

di Claudia Di Giorgio



IN SINTESI

- GOCE (Gravity Field and steady-state Ocean Circulation Explorer), il nuovo satellite dell'Agenzia spaziale europea, misurerà il campo gravitazionale terrestre con un dettaglio senza precedenti.
- Dotato di strumenti di altissima sensibilità, sarà la prima missione spaziale ad applicare il concetto di gradiometria.
- I dati raccolti da GOCE permetteranno di avere per la prima volta un sistema di riferimento unico della superficie fisica della Terra, che farà da standard in un'ampia gamma di discipline scientifiche e applicazioni pratiche.

Il 10 settembre prossimo, dal cosmodromo russo di Plesetsk, 800 chilometri circa a nord di Mosca, decollerà GOCE (Gravity Field and Steady-State Ocean Explorer), il primo satellite della serie Earth Explorer, il gruppo di missioni concepite e realizzate dall'Agenzia spaziale europea (ESA) nell'ambito del programma Living Planet allo scopo di raccogliere dati su alcune variabili determinanti del sistema terrestre.

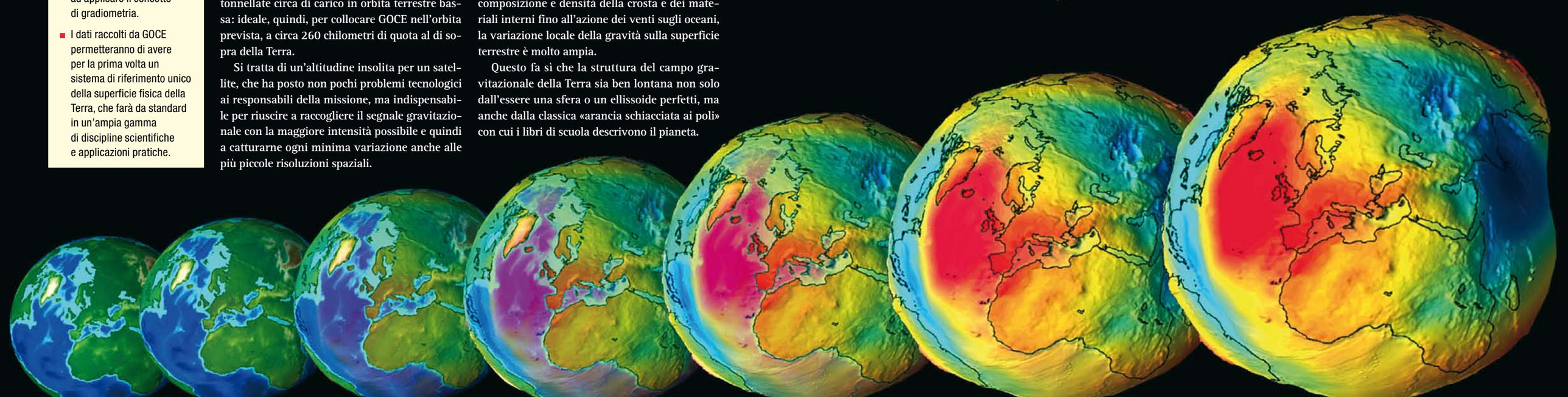
A trasportarlo sarà un Rockot, un vettore alto 29 metri che è in realtà la versione civile del missile balistico intercontinentale sovietico SS-19, modificato in modo da portare fino a 2 tonnellate circa di carico in orbita terrestre bassa: ideale, quindi, per collocare GOCE nell'orbita prevista, a circa 260 chilometri di quota al di sopra della Terra.

Si tratta di un'altitudine insolita per un satellite, che ha posto non pochi problemi tecnologici ai responsabili della missione, ma indispensabile per riuscire a raccogliere il segnale gravitazionale con la maggiore intensità possibile e quindi a catturarne ogni minima variazione anche alle più piccole risoluzioni spaziali.

Il compito di GOCE è infatti quello di misurare una delle forze fondamentali che regolano la nostra vita, il campo gravitazionale terrestre, determinandone forma e caratteristiche con un livello di dettaglio senza precedenti.

Come è noto, il valore medio dell'accelerazione di gravità g alla superficie terrestre, è di circa 9,8 metri al secondo quadrato (m/s^2), ma il valore esatto cambia a seconda del luogo. In conseguenza di numerosi fattori, che vanno dalla rotazione del pianeta alla sua sfericità, dalla presenza di rilievi montuosi o depressioni oceaniche alla dinamica delle masse continentali, dalla composizione e densità della crosta e dei materiali interni fino all'azione dei venti sugli oceani, la variazione locale della gravità sulla superficie terrestre è molto ampia.

Questo fa sì che la struttura del campo gravitazionale della Terra sia ben lontana non solo dall'essere una sfera o un ellissoide perfetti, ma anche dalla classica «arancia schiacciata ai poli» con cui i libri di scuola descrivono il pianeta.



Il geoide, la superficie equipotenziale del campo di gravità che passa per il livello medio degli oceani (in condizioni ideali di quiete, cioè senza correnti o maree), è altamente irregolare; forse l'immagine che ricorda di più è quella di una patata, o ancor meglio di una palla di plastilina un po' bitorzoluta, modellata dalle mani di un bambino.

La superficie del geoide è usata come riferimento in moltissimi contesti, dalle misure del livello dei mari (e quindi degli effetti del riscaldamento globale) ai rilevamenti topografici. Tuttavia le nostre attuali conoscenze del campo gravitazionale terrestre, ottenute con una serie di tecniche diverse, sono ancora incomplete, anche se negli ultimi venti o trent'anni la presenza dei satelliti artificiali ha permesso di compiere notevoli progressi.

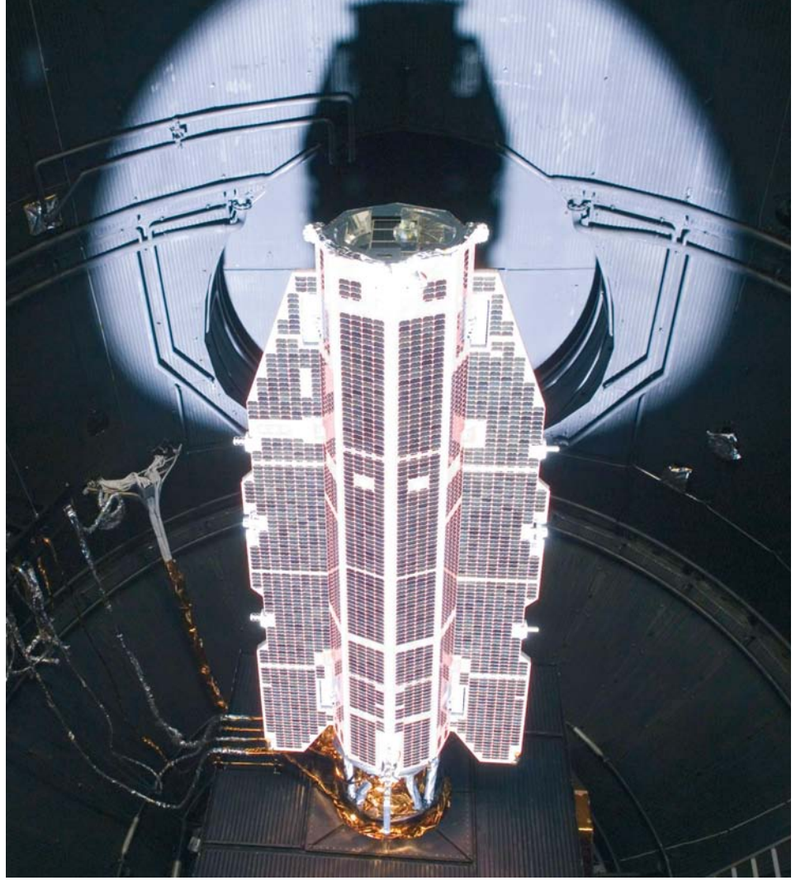
Surf nello spazio

Ma il vero passo in avanti si è avuto con l'avvento di una nuova generazione di satelliti dedicati in orbita bassa (*si veda il box a fronte*) in grado di misurare l'intero campo gravitazionale terrestre in modo uniforme.

Girando intorno alla Terra, questi satelliti registrano le anomalie del campo gravitazionale come variazioni rispetto a un'orbita perfettamente circolare o ellittica; in pratica, quando passano su un «rilievo» o su un «avvallamento» del campo si comportano un po' come una tavola da surf sulle onde dell'oceano, accelerando in corrispondenza di un'area dove l'intensità dell'attrazione gravitazionale è più forte, e rallentando dove è più debole. Seguendo il percorso del satellite con la massima precisione, si può quindi ricostruire il campo gravitazionale a partire dalle sue deviazioni dall'orbita.

GOCE rappresenta l'esempio più avanzato di questo innovativo concetto; l'estrema sensibilità e precisione dei suoi strumenti consentirà di elaborare una mappa del campo gravitazionale terrestre e un modello del geoide di un'accuratezza e di una risoluzione spaziale mai ottenute finora. Il risultato sarà una «fotografia» fedele della superficie fisica e delle caratteristiche più intime del nostro pianeta, che diventerà il riferimento standard per un'ampia gamma di discipline scientifiche e di applicazioni pratiche.

In particolare, GOCE dovrà svolgere la sua missione rispondendo a due requisiti principali; il primo consiste nel determinare le anomalie del campo gravitazionale con una precisione di un 1mGal, vale a dire un millesimo di Gal, o Galileo, l'unità di misura dell'accelerazione impressa dalla gravità. Poiché un Gal equivale a un centimetro per secondo quadrato (1 cm/s^2), la sensibilità di GOCE corrisponderà a 10^{-5} m/s^2 di deviazione massima dell'intensità del campo gravitazionale dal modello ellissoidale. Quanto al geoide, sarà determinato con una precisione radiale da 1 a 2 centimetri; inoltre, la risoluzione spaziale sarà di almeno 100 chilometri, la qualità delle misure sarà omogenea e la raccolta dei dati avrà una copertura totale del campo gravitazionale terrestre.



TEST DI STABILITÀ.
Il satellite all'interno del Large Solar Simulator dell'ESTEC, nei Paesi Bassi, pronto per essere esposto a temperature estreme per simulare l'ambiente spaziale, allo scopo di verificarne la stabilità termica.

La «Ferrari» dei satelliti

Concepito appositamente per assolvere a compiti di questa complessità e delicatezza, GOCE si è meritato alcune entusiastiche definizioni; da quella di «gioiello nella corona dell'ESA», grazie alle sfide scientifiche e tecnologiche superate con successo dall'Agenzia spaziale europea e dai partner industriali guidati da Thales Alenia Space Italia, a quella di «Ferrari dei satelliti di misura gravitazionale»: in questo secondo caso, anche grazie al suo aspetto insolitamente aerodinamico, che ricorda una punta di freccia.

In mezzo a sciami di satelliti che somigliano a una lavatrice incartata nella stagnola, GOCE si distingue infatti per eleganza, benché la sua sagoma affusolata e il suo bicromatismo (il satellite ha un lato freddo e «oscuro» e uno caldo e «lucente») non abbiano nulla a che vedere con l'estetica: a determinarne la forma sono state, naturalmente, le esigenze della missione.

Uno dei principali problemi della misurazione della gravità dallo spazio è che l'attrazione gravitazionale terrestre diminuisce via via che aumenta la distanza dalla Terra, ragion per cui l'orbita del satellite deve essere il più bassa possibile. Tuttavia, alla quota prescelta per l'orbita di GOCE, 260 chilometri circa al di sopra della superficie del pianeta, c'è ancora atmosfera in grado di generare attrito. E per ottenere la massima precisione dei risultati, le misurazioni devono avvenire in un ambiente privo di disturbi e dell'influenza di fattori diversi dalla forza di gravità, compresi i forti sbalzi di temperatura che il satellite subisce ogni volta che esce dall'ombra della Terra ed è colpito dalla luce del Sole.

Tutto questo ha obbligato i progettisti di GOCE a concepire un satellite in grado di volare in modo assolutamente «tranquillo», che generasse il minimo di resistenza all'aria e il minimo di disturbo da parte delle componenti meccaniche, e mantenesse inoltre un'eccezionale stabilità termica.

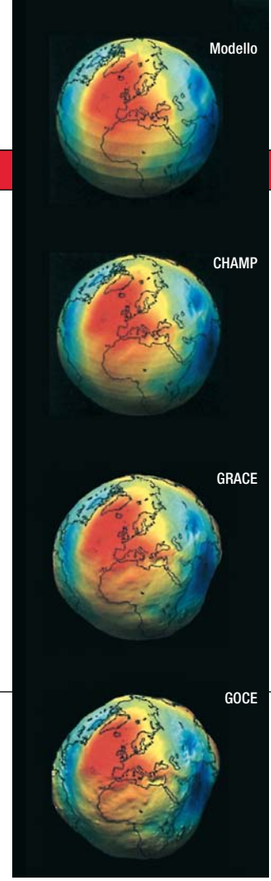
Il risultato è un satellite particolarmente «snello» (poco più di un metro di diametro per cinque di altezza), leggero (costruito in gran parte in plastica rinforzata in fibra di carbonio, pesa una tonnellata circa), termicamente stabile (grazie a uno specifico sistema di controllo particolarmente avanzato) e privo di parti mobili (corpo del satellite, strumenti e sistemi di controllo formano un'unica struttura rigida), che contrasterà l'attrito atmosferico mediante un sistema di propulsione elettrica a ioni che riceve informazioni dai sensori grativazionali interni. GOCE, in realtà, è il primo satellite in assoluto a usare la propulsione elettrica per compensare attivamente l'attrito dell'aria, e il primo realizzato dall'ESA a servirsi di un sottosistema di controllo *drag-free*.

Spostandosi a velocità ridotta, circa otto chilometri al secondo, in modo da mantenere le condizioni di caduta libera dell'ambiente spaziale, quando entrerà nella fase operativa seguirà un'orbita eliosincrona quasi circolare, studiata in modo da ottimizzare l'andamento delle misurazioni a intervalli dati di tempo.

GOCE si muoverà simmetricamente alla direzione di volo, offrendo al Sole sempre la stessa «faccia», ovviamente quella su cui si trovano i sei pannelli solari, quattro montati sul corpo del satellite e due sulle ali, in direzione quasi parallela a quella di volo. Sulle ali sono montate anche le antenne per la comunicazione, due in banda S e due GPS. Il lato «oscuro» del satellite servirà in parte per dissipare il calore, contribuendo così alla stabilità termica della navicella, mentre due alette di coda faranno da stabilizzatori aerodinamici passivi.

GOCE e gli altri

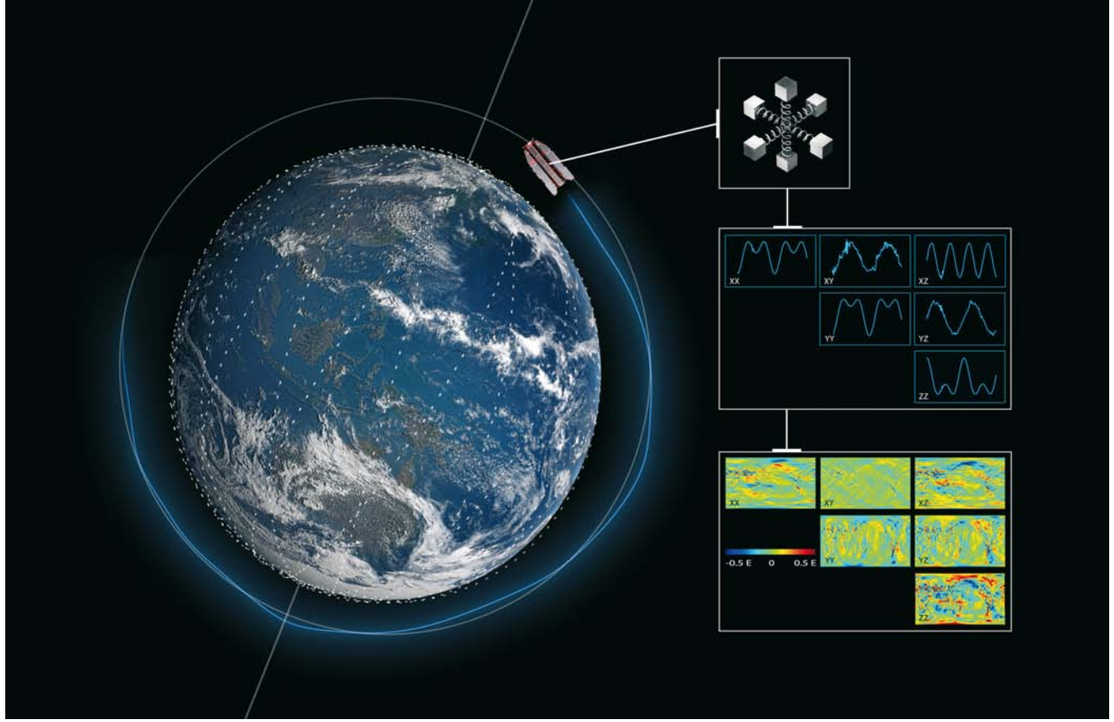
Pur essendo la prima missione spaziale ad applicare il principio della gradiometria, GOCE fa parte di un trio di satelliti dedicati allo studio del campo gravitazionale terrestre e concepiti per operare in modo complementare, due dei quali sono già in orbita. Il primo a volare è stato CHAMP (Challenging Minisatellite Payload), lanciato nel 2000, e tuttora operativo. Realizzato dal GFZ, il Centro tedesco per le ricerche geoscientifiche, in collaborazione con NASA e CNES, CHAMP effettua anche scandagli atmosferici e misurazioni del campo magnetico terrestre. Per le osservazioni gravitazionali si serve di un microaccelerometro e di un sistema di posizionamento GPS. Attualmente in fase di lenta discesa dalla quota iniziale di 454 chilometri, nel corso della sua missione CHAMP ha raccolto dati che hanno permesso di perfezionare in misura significativa i modelli gravitazionali globali con dettagli fino a qualche migliaio di chilometri; per esempio ha migliorato enormemente i dati relativi alle regioni polari, notoriamente difficili da raggiungere.
Nel 2002 è invece partita la missione GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment), una coppia di satelliti gemelli distanti l'uno dall'altro circa 220 chilometri, in orbita polare a circa 500 chilometri di quota. I due satelliti lavorano come un unico strumento: le loro rispettive posizioni, determinate da satelliti GPS, cambiano in corrispondenza delle variazioni del campo. Obiettivo principale della missione, una collaborazione tra Germania e Stati Uniti, è misurare le anomalie gravitazionali del campo terrestre dovute all'influenza del movimento delle masse d'acqua, con una risoluzione spaziale di 600-1000 chilometri.



GOCE è il primo satellite dotato di un sistema di controllo attivo dell'attrito atmosferico

IL SATELLITE IN PILLOLE

- La missione GOCE è costata circa 340 milioni di euro, compresi i costi del lancio, e avrà una durata nominale di 20 mesi.
- Il satellite è lungo 5,3 metri, ha un diametro di circa un metro e una massa totale di 1100 chilogrammi, inclusi 40 di xeno combustibile.
- È una struttura rigida, senza parti mobili: satellite, sensori ed elementi di controllo formano un unico strumento di misurazione della gravità.
- Il satellite seguirà un'orbita eliosincrona quasi circolare, a una quota media di 260 chilometri dalla Terra.
- La realizzazione di GOCE ha coinvolto 45 industrie di 13 nazioni europee guidate da Thales Alenia Space Italia in qualità di *prime contractor*, nei cui stabilimenti di Torino è stato integrato e testato il satellite.



SEI MISURE PER LA TERRA.
GOCE è la prima missione spaziale ad applicare il concetto di gradiometria. Le tre coppie di accelerometri del suo gradiometro, montate alle estremità di tre bracci ortogonali, effettueranno simultaneamente sei misurazioni indipendenti e complementari del campo gravitazionale della Terra.

I sensibilissimi strumenti di GOCE sono in grado di misurare accelerazioni pari a un decimo di millesimo di miliardesimo della gravità terrestre

Un fiocco di neve su una petroliera

Ma il cuore di GOCE, il suo più importante strumento di lavoro e la ragione principale delle sue avanzatissime capacità, è il gradiometro, o EEG (Electrostatic Gravity Gradiometer), il primo a volare nello spazio.

Collocato vicino alla massa centrale del satellite, lo strumento consiste in tre coppie di accelerometri montate su altrettanti bracci ultrastabili in carbonio-carbonio (*si veda la fotografia nella pagina a fronte*), disposti ortogonalmente tra loro in modo da ottenere rilevamenti nelle tre dimensioni spaziali. Alle estremità di ogni braccio sono montate, a una distanza di 50 centimetri l'una dall'altra, due masse di prova, o accelerometri, due parallelepipedi di lega metallica di platino e rodio che fluttuano all'interno di un contenitore. A ciascuna massa è applicata una forza elettrostatica, una tensione applicata tra il contenitore e i lati del cristallo, che garantisce che la distanza tra ogni coppia di masse rimanga costante.

In presenza di un'anomalia del campo gravitazionale, infatti, le due masse di prova tenderebbero ad avvicinarsi o ad allontanarsi in seguito all'accelerazione impressa dalla gravità. L'intensità della forza elettrostatica necessaria a contrastare questo effetto mantenendo le masse al centro esatto del contenitore permette di calcolare l'intensità dell'anomalia gravitazionale.

La sensibilità degli accelerometri di GOCE è straordinaria, cento volte più elevata di quella di qualunque altro accelerometro usato finora nello spazio: ciascuno di essi è in grado di misurare accelerazioni pari a 10^{-13} volte la gravità sulla superficie terrestre. Non a caso, la loro sensibilità è stata paragonata alla capacità di misurare l'accelerazione gravitazionale impressa da un fiocco di neve che si posa su una petroliera.

Tuttavia l'attrazione della gravità terrestre a 260 chilometri di quota è molto debole, e può risultare disturbata. Per eliminare il problema si sottraggono tra loro i risultati dei due accelerometri di ogni braccio. Quel che rimane è la differenza di accelerazione provocata dall'attrazione della Terra, cioè il gradiente di gravità.

La configurazione ortogonale dei bracci con le coppie di accelerometri (*si veda anche l'illustrazione a fronte*) fa sì che la combinazione delle loro misurazioni consenta di derivare una mappa del gradiente di gravità che copre uniformemente tutta la Terra, escluse piccole aree intorno ai poli.

I compiti del gradiometro comunque non finiscono qui. Le sue rilevazioni, più specificamente la media delle accelerazioni misurate dalle due masse di un braccio, servono anche a informare il computer di bordo sugli effetti di decelerazione dell'attrito atmosferico sul satellite, in modo che il motore a ioni intervenga a compensarli adeguatamente, garantendo la tranquilla prosecuzione del volo di GOCE in condizioni *drag-free*.

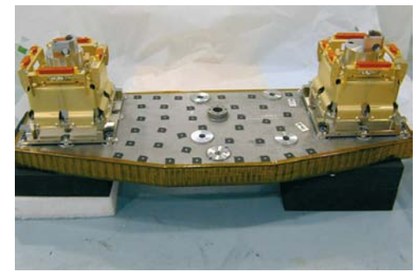
Per avere una mappa del campo gravitazionale completa e qualitativamente omogenea a ogni scala spaziale, però, la sensibilità del gradiometro, che rileva solo le anomalie su piccola scala, non basta. Le variazioni più ampie del campo gravitazionale vanno derivate dall'analisi delle perturbazioni del movimento orbitale del satellite. La posizione di GOCE sarà quindi continuamente seguita e determinata dall'alto da altri satelliti, quelli del sistema di navigazione globale GPS, in orbita a 20.000 chilometri di quota, riprendendo un concetto già applicato con successo nelle precedenti missioni gravitazionali spaziali CHAMP e GRACE.

A questo scopo, a bordo di GOCE c'è un secondo strumento, SSTI (Satellite-to-Satellite Tracking Instrument): in pratica, un sofisticatissimo ricevitore GPS a doppia frequenza (L1/L2), in grado di acquisire contemporaneamente i segnali di 12 satelliti della costellazione GPS.

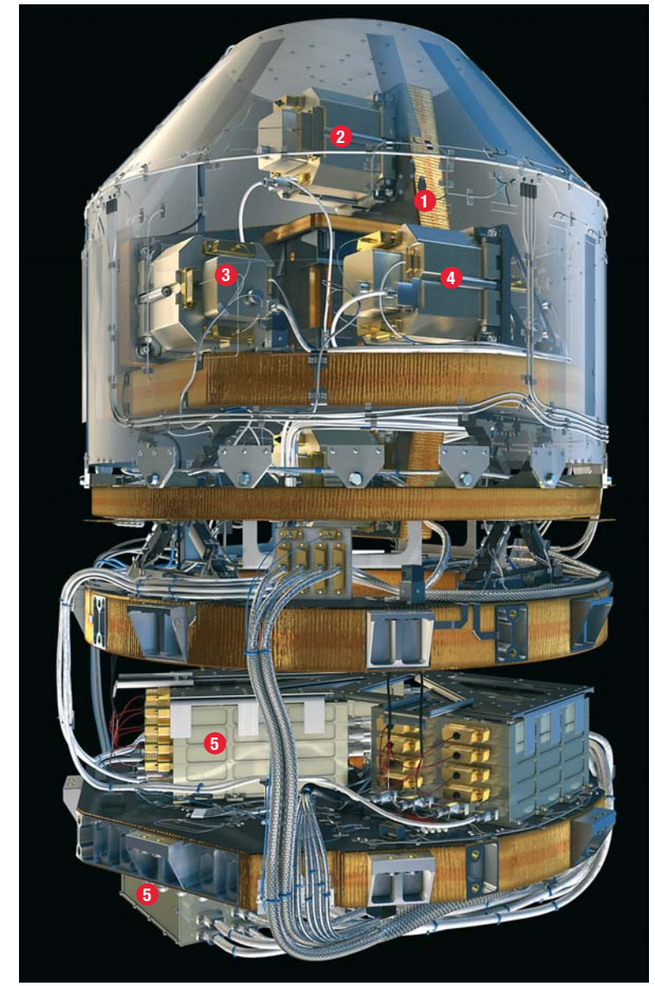
Dentro la Terra e sopra i mari

I dati raccolti da GOCE avranno un impatto straordinario su una gamma molto ampia di settori, a cominciare dallo studio dei processi interni della Terra. Disponendo di informazioni accurate e omogenee sull'intero campo gravitazionale terrestre, sarà possibile combinarle con i dati sismici e ottenere una mappa dettagliata delle variazioni di densità della litosfera fino a una profondità di circa 200 chilometri. Questo contribuirà a conoscere meglio ciò che sta avvenendo nelle zone di subduzione tra le zolle tettoniche, e a comprendere con maggiore dettaglio processi quali la formazione delle montagne oppure il sollevamento della crosta terrestre in corrispondenza di regioni come il Canada e la Scandinavia, (dove attualmente si

SU OGNI BRACCIO GRADIOMETRICO sono montate due masse di prova che un campo elettrostatico mantiene a una distanza costante, con un margine del diametro di un atomo.



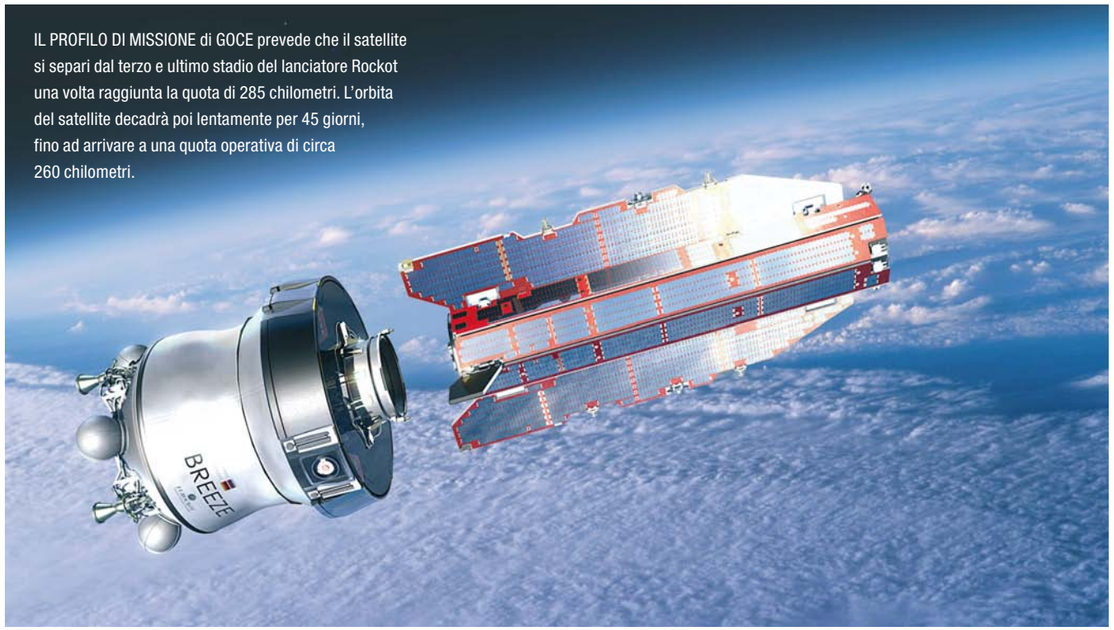
Nel cuore di GOCE



Lo strumento principale di GOCE è l'Electrostatic Gravity Gradiometer (EGG), il primo gradiometro a volare nello spazio. L'illustrazione mostra lo strumento privo della copertura esterna. Il gradiometro consiste di tre coppie di accelerometri ultrasensibili, montati su tre bracci disposti ortogonalmente, la cui stabilità ha richiesto lo sviluppo di una speciale struttura di supporto dedicata 1 in carbonio-carbonio a nido d'ape.
Un braccio 2 è allineato alla traiettoria del satellite, un altro 3 punta approssimativamente in direzione del centro della Terra e il terzo 4 è perpendicolare agli altri due (*nell'illustrazione sono visibili solo i corpi di uno dei due accelerometri di ciascun braccio*). Combinando le differenti misure di accelerazione è possibile derivare le componenti del gradiente di gravità. Le unità di controllo elettronico del gradiometro 5 sono installate alla base dello strumento.
In alto a sinistra in questa pagina, la posizione del gradiometro all'interno di GOCE, vicino al centro di massa del satellite, orientato in figura in direzione di volo.

Esploratori di un pianeta che vive

GOCE è il primo satellite della serie degli Earth Explorer, le missioni di ricerca del programma di osservazione della Terra *Living Planet* dell'Agenzia spaziale europea (ESA), ognuna delle quali è dedicata a una componente cruciale del complesso sistema di variabili del nostro pianeta.
La missione SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity, *a sinistra al centro*) userà un radiometro per osservare la salinità degli oceani e l'umidità delle masse terrestri allo scopo di conoscere meglio lo stato delle risorse idriche della Terra e migliorare i modelli di previsione meteorologica e climatica.
Il sofisticato radar altimetrico di CryoSat-2 (*a sinistra in basso*) misurerà lo spessore delle calotte polari e dei ghiacchi marini per rilevarne le variazioni stagionali e interannuali con un dettaglio di pochi centimetri.
I tre satelliti della costellazione Swarm (*a destra in alto*) effettueranno un rilevamento ad alta precisione e risoluzione del campo magnetico terrestre, raccogliendo dati utili anche a studiarne l'evoluzione nel tempo.
ADM-Aeolus (Atmospheric Dynamics Mission, *a destra al centro*) sarà la prima missione spaziale a misurare il profilo dei venti su scala globale grazie a uno strumento a tecnologia lidar (rilevamento laser e radar).
EarthCARE (Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer, *a destra in basso*) userà quattro diversi strumenti per registrare e confrontare i valori relativi a nubi e aerosol e verificarne il ruolo nella regolazione del clima.



IL PROFILO DI MISSIONE di GOCE prevede che il satellite si separi dal terzo e ultimo stadio del lanciatore Rockot una volta raggiunta la quota di 285 chilometri. L'orbita del satellite decadrà poi lentamente per 45 giorni, fino ad arrivare a una quota operativa di circa 260 chilometri.

registra un innalzamento da uno a due centimetri all'anno, in seguito alla scomparsa della spessa coltre di ghiaccio dell'ultima era glaciale.

Un'altra disciplina a cui le misure di GOCE daranno un contributo cruciale è lo studio della circolazione oceanica. Gli spostamenti di acque calde e fredde determinati dalla circolazione degli oceani hanno un ruolo essenziale nella regolazione del clima, ma non ne sappiamo ancora abbastanza per fare previsioni accurate sul cambiamento climatico. I dati altimetrici da satellite e radar usati per effettuare stime sul trasporto di calore, sale e acqua dolce sono infatti limitati dallo scarso dettaglio del geoide ora disponibile.

Grazie a GOCE diventerà possibile modellare la superficie del geoide con un'accuratezza di 1-2 centimetri, ottenendo informazioni sia sulla circolazione delle acque superficiali sia sulle correnti più profonde. Il geoide realizzato in base ai dati del satellite ESA sarà il riferimento globale per tutte le applicazioni oceanografiche, e potrà essere usato, insieme ai dati altimetrici storici, per costruire una retrospettiva dettagliata delle variazioni oceaniche e dei loro effetti.

Una misura per tutti

Oggi l'altezza sul livello medio del mare di una città, di una montagna o di qualunque altro punto geografico viene determinata usando come termine di riferimento il livello del mare misurato localmente in un certo arco di tempo. Poiché il livello del mare può variare notevolmente da un luogo all'altro, sia su grande scala (l'Oceano Atlantico nel suo complesso è più basso del Pacifico di 40 centimetri) sia su scale più piccole (alle due estremità del canale di Panama c'è un dislivello di 20 centimetri), questo porta a differenze marcate tra i sistemi altimetrici locali, con conseguenze anche importanti dal punto di vista pratico.

La realizzazione del grande ponte sull'Øresund (*sopra nella foto*) tra Svezia e Danimarca, per esempio, ha comportato la necessità di collegare anche due sistemi altimetrici nazionali, obbligando a lunghi e faticosi procedimenti topografici per misurare in dettaglio i dislivelli lungo una distanza di 22 chilometri.

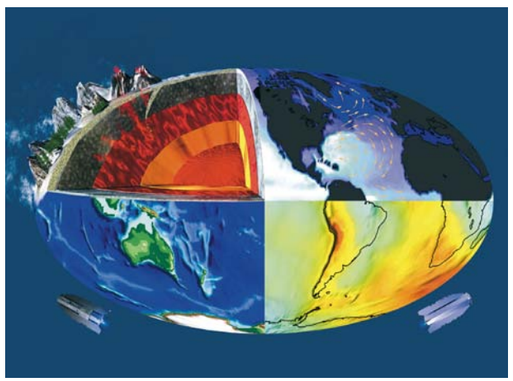
Il geoide di GOCE metterà fine a questa frammentazione di sistemi, che per la prima volta potranno essere unificati grazie alla disponibilità di una superficie di riferimento valida su scala globale e con una risoluzione e un dettaglio senza confronto.

Un sistema unificato di riferimento delle altitudini permetterà di effettuare confronti diretti, per esempio tra l'altezza del Monte Bianco e quella dell'Everest, e tra i livelli dei mari da una parte all'altra del pianeta, e renderà più semplice, veloce ed economico costruire opere di collegamento al di sopra di vasti specchi d'acqua e attraverso le frontiere nazionali, eliminando lunghi e costosi procedimenti di livellazione.

In un periodo in cui la domanda di dati di osservazione della Terra è in continuo aumento, il contributo di GOCE, che inaugura la serie degli Earth Explorer (*si veda il box a fronte*) sarà quindi decisivo, e la sua influenza si estenderà ben oltre i confini del Vecchio Continente.

Negli ultimi mesi, con l'arrivo del laboratorio scientifico Columbus sulla Stazione spaziale internazionale e il successo della missione del primo cargo automatico ATV, l'ESA ha tagliato alcuni importanti traguardi: a cui ora va ad aggiungersi il lancio di GOCE nel confermare il ruolo di primo piano dell'Europa nella scena spaziale globale. ■

Brian Rasmussen/AP Photo/La Presse (*ponte sull'Øresund*)



DAI GHIACCI AI PONTI.
La mappa del campo gravitazionale terrestre e il dettagliato modello di geoide derivati dalle misurazioni di GOCE avranno un impatto decisivo su numerosi settori scientifici e applicativi, dallo studio dei ghiacci e della circolazione oceanica ai processi fisici all'interno della Terra, fino ai rilevamenti topografici e alla realizzazione di grandi opere come il ponte ferroviario e stradale che collega Svezia e Danimarca attraverso l'Øresund (*foto al centro*).

Questo articolo si basa in larga misura sui materiali informativi e iconografici gentilmente concessi dall'Agenzia spaziale europea. In particolare, si ringraziano il Directorate of Earth Observation Programmes e il Communication and Knowledge Department dell'ESA, e Danilo Muzi, Project Manager di GOCE.
Tutte le immagini, salvo ove diversamente indicato, sono cortesia ESA/AOES MediaLab.

Nuove armi contro il tumore al seno

Le terapie più recenti stanno aiutando i medici a realizzare cure sempre più efficaci e su misura per singole pazienti

di Francisco J. Esteva e Gabriel N. Hortobagyi

IN SINTESI

- I tassi di sopravvivenza per pazienti con tumore al seno sono aumentati in modo significativo in Europa e in Nord America, grazie a un aumento di diagnosi precoci e a nuovi trattamenti.
- Molti di questi nuovi trattamenti bersagliano molecole specifiche delle cellule tumorali, permettendo ai medici di adattare le terapie al profilo del tumore di ciascuna paziente.
- Il tumore al seno è stato il primo tumore solido per cui sono state disponibili terapie molecolari su misura. Il successo di questa tecnica promette progressi straordinari.

Il tumore al seno è il tumore maligno diagnosticato più di frequente nelle donne. Eppure, a differenza del tasso di sopravvivenza di persone con tumore al polmone, il tasso di sopravvivenza di donne con diagnosi di tumore al seno sta aumentando in maniera significativa da dieci anni a questa parte, tanto che questo patologia presto potrebbe perdere il secondo posto nella tragica classifica dei tumori che mietono più vittime. E non c'è nulla che potrebbe fare più piacere a medici come noi.

Questo miglioramento di prospettiva è dovuto in parte all'individuazione più precoce del tumore al seno, che deriva dalla maggiore consapevolezza di un controllo regolare e da un miglior accesso alle tecniche mammografiche. Le pazienti con tumore al seno, però, stanno beneficiando anche della rapidità delle ricerche che hanno permesso di capire molto meglio questa malattia e di una gamma più ampia di terapie che i medici combinano e armonizzano in modo da adattarle a singole pazienti. Nei dieci anni appena passati, si è arrivati addirittura a bersagliare con farmaci alcune molecole specifiche che guidano il cancro e che si trovano nel tessuto tumorale.

In effetti, il tumore al seno è stato il primo tumore solido trattato con questo metodo basato su bersagli molecolari quando, nel 1998, fu approvato il trastuzumab. Il farmaco era stato studiato per attaccare la proteina HER2, che promuove la crescita di tumori aggressivi. Prima dell'arrivo di questo farmaco, la diagnosi di tumore caratterizzato da una produzione eccessiva di HER2 era una notizia nefasta per le pazienti. Ora è uno dei tumori che possono avere la prognosi migliore, perché i medici hanno un numero sempre più consistente di armi efficaci contro HER2.

I prossimi dieci anni promettono di essere stimolanti e produttivi nel settore delle terapie tumorali basate su bersagli molecolari: altri farmaci, attualmente in fase di studio su pazienti e modelli animali, stanno rendendo possibile la caccia a una varietà sempre più grande di caratteristiche molecolari dei tumori, caratteristiche cruciali nell'innesco e nella sopravvivenza di processi maligni e nella progressione del cancro verso stadi minacciosi. In parallelo con i miglioramenti portati alle vecchie terapie, questa nuova generazione di farmaci offre ai medici diverse alternative per personalizzare la cura e quindi fronteggiare una serie di caratteristiche molecolari tumorali. Inoltre questi farmaci riflettono un crescente e condiviso riconoscimento del fatto che il tumore al seno non è un'unica malattia.

L'evoluzione delle terapie

Sebbene la prospettiva di adattare le terapie a caratteristiche molecolari di singoli tumori sia incredibilmente incoraggiante, anche i progressi ottenuti in passato contribuiscono a ridurre il tasso di mortalità di donne con tumore al seno. Il miglioramento delle tecniche mammografiche, per esempio, ha permesso di individuare e confermare un maggior numero di casi precoci. Una vera manna, visto che se è individuato in tempo, il cancro al seno è curabile.

Le tecniche di *imaging* più recenti includono la mammografia digitale (che produce un'immagine più nitida rispetto alla mammografia tradizionale), l'ecografia e l'imaging a risonanza magnetica (MRI). Oggi, alle donne con rischio elevato di sviluppare un tumore al seno, in base alla storia familiare o a causa di mutazioni in uno dei geni *BRCA*, è offerto uno controllo annuale con MRI. L'ecografia in genere è riservata a controlli successivi eseguiti nel caso in cui la mammografia o la palpazione medica abbiano rilevato anomalie.

James Porto

Inoltre negli ultimi vent'anni gli approcci chirurgici per l'asportazione del tumore sono stati modificati. Dalla drastica rimozione di tessuto in donne con tumore che sembrava confinato a una piccola regione del seno si è passati a una terapia conservativa della mammelle. E ancora, la radioterapia è più precisa, e quindi meno dannosa per tessuti normali come quelli del cuore e dei polmoni. Sono tutti progressi che hanno reso le terapie meno distruttive e al tempo stesso hanno garantito risultati positivi.

Oltre a questi miglioramenti nell'individuazione e nel trattamento locale di tumori mammari, l'uso di terapie sistemiche come cure integrative, o adiuvanti, è diventato più sofisticato grazie a nuovi farmaci, a modalità migliori di somministrazione e alla gestione degli effetti collaterali. Queste terapie puntano a distruggere ogni cellula maligna che non è stata eliminata dall'intervento chirurgico o dalla radioterapia. Un simile approccio è giustificato dal fatto che anche tumori di piccole dimensioni e apparentemente confinati possono avere metastasi microscopiche e silenti, cioè tumori non rilevabili diffusi in zone distanti del corpo. Aggredendo questi tumori invisibili, una chemioterapia adiuvante può prolungare gli intervalli di tempo durante i quali la paziente non è malata e aumentare il tasso generale di sopravvivenza.

La chemioterapia adiuvante sta anche aumentando le probabilità di sopravvivenza per i casi di tumore in fase avanzata. Negli anni settanta il nostro e altri gruppi hanno sviluppato programmi terapeutici multidisciplinari per pazienti con «tumore mammario localmente avanzato», un tumore al seno che ha invaso i tessuti vicini. Spesso questo tipo di cancro non è diagnosticato in tempo utile per essere curato con la sola asportazione chirurgica. Il nostro approccio consiste nel trattare le pazienti con questo tipo di tumore somministrando loro una chemioterapia preoperatoria, o neoadiuvante, per ridurre il tumore a dimensioni operabili: una volta raggiunte le dimensioni adeguate si interviene chirurgicamente, e poi si esegue un ulteriore ciclo di chemioterapia e radioterapia.

Grazie a questo approccio, negli ultimi trent'anni gruppi specializzati di medici, infermieri e altri operatori sanitari hanno incrementato notevolmente il tasso di cura per pazienti con tumore mammario localmente avanzato. Ora, anche pa-

zienti con tumori che hanno prodotto metastasi in altri organi possono accedere a nuove terapie che prolungano la loro sopravvivenza, e a cure di sostegno che migliorano la loro qualità di vita.

Un altro punto di forza delle terapie per il cancro al seno, almeno per pazienti con tumori dipendenti da estrogeno o progesterone, è la terapia endocrina. Le manipolazioni ormonali per curare il cancro al seno risalgono agli anni novanta del XIX secolo, quando i medici notarono una regressione delle massa tumorale dopo la rimozione chirurgica delle ovaie in donne in pre-menopausa con tumore mammario in fase avanzata. Nel 1966 i ricercatori hanno identificato i recettori ormonali, cioè molecole che si legano a ormoni specifici, in diversi tessuti, compreso quello mammario. Studi successivi hanno dimostrato che il 75 per cento dei tumori mammari invasivi ha recettori per l'estrogeno, per il progesterone o per entrambi, suggerendo quindi che questi due ormoni avrebbero potuto diventare bersagli terapeutici.

Nel 1977 gli Stati Uniti sono stati il primo paese ad approvare il farmaco anti-estrogenico tamoxifene per la cura di tumori mammari avanzati in donne post-menopausa. Il tamoxifene si lega al recettore per l'estrogeno, impedendo all'ormone di fare altrettanto. Da allora il tamoxifene si è dimostrato efficace per pazienti con tumori mammari localizzati che hanno recettori per l'estrogeno o il progesterone, ma anche come terapia preventiva in donne sane con un elevato rischio di sviluppare un tumore al seno. Nel frattempo, nuovi farmaci che inibiscono l'enzima aromatasi disattivando la produzione naturale di estrogeno nell'organismo si sono rivelati più efficaci rispetto al tamoxifene in donne in post-menopausa.

PILLOLE SUL TUMORE

Mutazioni ereditarie nel gene *BRCA1* possono moltiplicare di 10 volte il rischio di tumore al seno, ma solo lo scorso anno i ricercatori hanno scoperto il motivo. Poiché *BRCA1* è coinvolto nella riparazione del DNA, il suo malfunzionamento rende più probabili errori in altri geni che favoriscono l'insorgere di tumori.

Nel 2002, a seguito di uno studio secondo cui la terapia ormonale sostitutiva (HRT) aumentava il rischio di tumore al seno nelle donne in menopausa, l'uso di questa terapia è diminuito bruscamente. L'anno successivo, negli Stati Uniti, si è verificato un sensibile calo dell'incidenza di tumori al seno sia invasivi (7,3 per cento) che non invasivi (5,5 per cento).

LA CRESCENTE CONSAPEVOLEZZA dell'importanza di una diagnosi precoce e l'aumento dei fondi per la ricerca hanno portato a un notevole declino della mortalità per cancro al seno nei paesi sviluppati.

CRONOLOGIA DEI TRATTAMENTI

I medici hanno iniziato a trattare in maniera aggressiva il tumore al seno nel XIX secolo: la prima mastectomia è stata fatta nel 1882. Ma le intuizioni sui meccanismi che provocano la malattia, che in seguito avrebbero condotto a terapie sempre più mirate, sono arrivate con le scoperte realizzate negli anni cinquanta del XX secolo.

1880-1890

George T. Beatson

L'esistenza di una relazione fra ormoni e cancro è stata ipotizzata quando i medici hanno osservato una significativa regressione di tumori al seno dopo la rimozione delle ovaie o dopo l'inizio della menopausa.
1896: George T. Beatson per la prima volta rimuove le ovaie come trattamento per un tumore al seno.

1950-1960

1951: Si scopre che l'estrogeno e il testosterone dirigono, rispettivamente, la crescita del tumore mammario e di quello prostatico.
1958: Identificate alcune proteine, i «fattori di crescita», che aiutano il tumore a proliferare.
1966: Scoperto il recettore per l'estrogeno.

Struttura proteica del recettore per l'estrogeno

1970-1980

1976: Scoperti nei mammiferi alcuni «oncogeni» che promuovono lo sviluppo di tumori.
1976: Trial clinici iniziano a dimostrare che una nodulectomia mammaria seguita da radioterapia è efficace come una mastectomia.
1977: Negli Stati Uniti è approvato l'uso del tamoxifene, farmaco che inibisce l'azione ormonale, per la cura di tumori mammari sensibili all'estrogeno o al progesterone.
1988: I risultati di alcuni trial clinici dimostrano che una chemioterapia preoperatoria riduce il volume tumorale, rendendo possibili interventi chirurgici meno invasivi.

Tamoxifene, modulatore selettivo dei recettori dell'estrogeno

1990-2008

1994: Isolato il gene *BRCA1*, noto per aumentare la suscettibilità al tumore al seno.
1997: Negli Stati Uniti è approvato l'uso del letrozolo, farmaco che inibisce la sintesi dell'estrogeno, per pazienti con tumore che non risponde alla terapia con il tamoxifene.
1998: La prima terapia molecolare mirata contro il cancro, il trastuzumab, è approvata negli Stati Uniti per i casi di tumore della mammella.
2007: Il lapatinib, farmaco inibitore dei segnali di crescita cellulare, è approvato negli Stati Uniti per i casi di tumore al seno.
2008: Negli Stati Uniti è approvato l'uso del bevacizumab, farmaco inibitore dell'angiogenesi, per il trattamento dei tumori al seno.

TRASTUZUMAB, farmaco conosciuto anche col nome commerciale di Herceptin.

In un certo senso, dunque, i recettori per l'estrogeno e il progesterone sono diventati i primi marcatori tumorali a essere bersagliati con farmaci, anche se sarebbe opportuno fare un'importante distinzione fra questi bersagli e quelli più recenti identificati negli ultimi dieci anni. I recettori per gli steroidi sessuali promuovono la proliferazione cellulare in tessuti sani e nei tumori, quindi sopprimere la loro capacità di trasmettere segnali di crescita aiuta a tenere sotto controllo le dimensioni del tumore. Inoltre, in alcuni casi anche i cambiamenti di forma o di funzione del recettore possono contribuire alle caratteristiche maligne delle cellule tumorali. Ma nei tumori mammari è raro osservare una mutazione del gene che codifica per il recettore per l'estrogeno: ciò significa che quel gene non causa tumori.

Forse la scoperta più importante ottenuta dalle ricerche sul cancro da quando sono stati individuati i recettori per gli ormoni sessuali è che determinati geni, quando mutano, possono trasformare una cellula normale in cellula tumorale. Una volta mutati, questi geni vengono chiamati oncogèni, e sarebbero responsabili sia della trasformazione di una cellula normale in cellula maligna sia del processo di crescita del tumore. Questo è il motivo per cui oggi il tumore al seno – come tutti i tumori – è descritto fondamentalmente come una malattia di geni. Una mutazione oncogenica, come un piccolo cambiamento della sequenza di DNA di un gene, potrebbe disattivare un gene con funzione protettiva, o viceversa stimolare l'attività di un gene che favorisce la crescita tumorale. In alcuni casi, si ha la delezione o la duplicazione interi geni (*si veda il box a pp. 76-77*).

Oggi i tumori si possono classificare sulla base dei geni più attivi del normale nelle cellule tumorali, o di quelli soppressi, e in base ai cambiamenti che derivano nella produzione e nella funzione delle proteine codificate da questi geni. I geni danneggiati variano da tumore a tumore, e questa eterogeneità genetica spiega perché i tumori mammari di singole pazienti possono comportarsi in modo diverso. Alcuni tumori, per esempio, hanno un limitato potenziale invasivo e metastatico, mentre altri si diffondono rapidamente a organi distanti.

Conoscere il profilo molecolare di un tumore consentirebbe a un medico di concentrarsi sull'inibizione del meccanismo che guida quel particolare tumore, scegliendo un gruppo di farmaci in grado di interferire con molecole specifiche coinvolte nell'avvio, la crescita e la diffusione del cancro. Il successo del trastuzumab e di altre terapie che hanno come bersaglio specifico HER-2 illustra il potenziale di questo approccio per combattere il tumore al seno.

Trovare il bersaglio

All'inizio degli anni ottanta alcuni ricercatori del Massachusetts Institute of Technology avevano scoperto in tumori neurali di ratto la forma mutata del gene che codifica per la proteina HER-2, e avevano chiamato *Neu* questo oncogene. Subito dopo i ricercatori hanno capito che *Neu* è la versione dei mammiferi del gene *ERBB2*, già identificato nei virus, e *Neu* è diventato conosciuto anche come *ERBB2*. Ma in seguito, quando gli scienziati hanno identificato la proteina per cui codifica *ERBB2*, hanno capito che è strettamente correlata a una proteina della membrana cellulare chiamata «recettore per il fattore di crescita epidermico» (EGFR). E infine, dopo avere isolato la versione umana di *ERBB2*, hanno battezzato questo gene «recettore per il fattore di crescita epidermico umano 2» (*HER2*).

In seguito la famiglia di proteine EGFR si è rivelata importante per la crescita di cellule tumorali in una grande varietà di tumori. Quando sono attivati da specifiche molecole, chiamate «ligandi», questi recettori trasmettono un segnale che stimola la proliferazione cellulare promuovendo una cascata di interazioni molecolari interne alla cellula, ovvero stimolano l'attività di geni che codificano per proteine che a loro volta regolano l'attività di altri geni collocati «più a valle». Poco dopo la scoperta di *HER2*, gli scienziati hanno trovato che nelle cellule del tumore al seno questo gene è spesso presente in duplice copia, e che il fatto di avere più copie di *HER2* è associato a una prognosi infausta.

Alcuni studi hanno poi confermato che l'aggiunta di copie di *HER2* trasforma una cellula normale in tumorale, una caratteristica degli oncogeni. Visto che il 20 per cento dei tumori al seno produce quantità eccessive di HER2, questa proteina è diventata un bersaglio terapeutico. Gli scienziati della Genentech avevano creato il trastuzumab alla fine degli anni ottanta, realizzando anticorpi monoclonali che si legano al recettore per HER2 impedendone l'attivazione. Nel corso di trial clinici si era scoperto che il trastuzumab poteva allungare la sopravvivenza di pazienti con tumore mammario sia in uno stadio iniziale sia in fase metastatica.

Il successo di questo farmaco ha favorito lo sviluppo di terapie analoghe basate su anticorpi, come il pertuzumab, che si lega a HER2 in un punto diverso rispetto al trastuzumab, e che impedisce al recettore di interagire con altri membri della sua famiglia presenti sulla membrana cellulare come, per esempio, EGFR e HER3. Bloccare queste interazioni riduce il segnale che stimola la crescita lungo vie di comunicazione molecolare intracellulari a valle di questi recettori. Il pertuzumab può addirittura interrompere certi tipi di attivazione di HER2 in

GLI AUTORI

FRANCISCO J. ESTEVA è direttore del Breast Cancer Translational Research Laboratory presso l'M.D. Anderson Cancer Center dell'Università del Texas, dove GABRIEL N. HORTOBAGYI dirige il Multidisciplinary Breast Cancer Research Program. Esteva, professore associato al Dipartimento di oncologia medica mammaria e a quello di oncologia molecolare e cellulare, sta cercando di colmare il divario esistente fra la ricerca di base e la cura del paziente. Hortobagyi, che recentemente è stato presidente dell'American Society of Clinical Oncology, è anche preside e professore del Dipartimento di oncologia medica mammaria. La sua ricerca riguarda tutti gli aspetti biologici, gestionali e terapeutici del tumore al seno, e ha ottenuto numerosi riconoscimenti da parte della comunità scientifica.

Angela Rowlings/AP Photo (*corridori*); Lisa Apfelbacher (*pillole*); cronologia: Wellcome Library, Londra (*Beatson*); Mark J. Winter/Photo Researchers, Inc. (*recettori estrogeni*); Science Museum (*tamoxifen*); P. Marazzi/Photo Researchers, Inc. (*herceptin*)

Medical Graphics & Photography/Università del Texas, M.D. Anderson Cancer Center (*Esteva*); John Smallwood (*Hortobagyi*)

cellule tumorali diventate resistenti al trastuzumab. In più, abbiamo dimostrato che l'abbinamento di trastuzumab e pertuzumab incrementa il tasso di morte cellulare in cellule di tumore mammario che producono quantità eccessive di HER2.

Un altro metodo per bersagliare il recettore HER2 prevede la formazione di un complesso tra anticorpi e una potente tossina. Gli anticorpi trasportano la tossina dentro la cellula tumorale: una volta entrata, la tossina si stacca e uccide la cellula. Questo approccio si è rivelato efficace in altri tipi di tumore, come la leucemia mieloide acuta, e attualmente sono in corso trial clinici su pazienti con tumore mammario metastatico per determinare la sicurezza e l'efficacia di altri accoppiamenti basati sul trastuzumab.

Per inviare un segnale di crescita all'interno di una cellula, è necessario che la regione intracellulare della famiglia di proteine EGFR sia attivata dalle tirosin-chinasi, enzimi che modificano chimicamente un segmento proteico conosciuto come «dominio tirosin-chinasico». Le tirosin-chinasi agiscono da fattori che stimolano la crescita, e inibirle direttamente è un altro modo per silenziare i segnali di crescita mediati da EGFR. Ecco perché le case farmaceutiche mirano allo sviluppo clinico di farmaci del genere. Il lapatinib è un duplice inibitore della tirosin-chinasi EGFR/HER2 che ha dato notevoli risultati sperimentali, portando all'arresto della crescita e al suicidio di linee cellulari di tumore mammario che producono HER2 in eccesso.

Un modo per incrementare l'efficacia di una terapia mirata su HER-2 è dunque abbinare un farmaco come il trastuzumab a un inibitore della tirosin-chinasi come il lapatinib. Nelle linee cellulari di tumore al seno, questa combinazione produce una maggior inibizione sinergica della crescita cellulare e tassi più elevati di apoptosi (suicidio cellulare). Dopo un trattamento prolungato, il lapatinib ha efficacemente indotto il suicidio cellulare anche in linee cellulari resistenti al trastuzumab. Un recente trial clinico (in fase III) di ampie dimensioni su pazienti con tumore metastatico al seno e con una sovraproduzione di HER-2 – donne colpite da una forma tumorale diventata resistente al trastuzumab – ha dimostrato che la chemioterapia con lapatinib abbinato con capecitabina ha raddoppiato il tempo medio di progressione rispetto al trattamento con sola capecitabina.

Sulla base di questi risultati, lo scorso anno negli Stati Uniti è stato approvato l'uso di lapatinib abbinato con capecitabina per la cura del tumore mammario metastatico. Attualmente sono in corso trial clinici per determinare la validità del lapatinib come terapia adiuvante in una gamma più ampia di circostanze, come sono in corso altri trial relativi a diversi inibitori della tirosin-chinasi che hanno come bersaglio HER2 e EGFR.

Oggi i medici non considerano più il tumore al seno come un'unica malattia anche grazie ai nuovi trattamenti

Trovare sistemi alternativi per interferire con le stesse vie biochimiche di crescita cellulare è importante perché spesso le cellule tumorali trovano il modo di sfuggire all'azione di singoli farmaci. Alcune ricerche stanno cercando di capire come e perché le cellule tumorali sviluppino resistenza al trastuzumab, per poi ideare associazioni farmacologiche più efficienti o nuove molecole terapeutiche per pazienti affette da un tumore che produce HER2 in eccesso.

Per esempio, nel corso di studi su colture cellulari e modelli animali abbiamo scoperto che le cellule tumorali sfruttano tanti meccanismi diversi per sopravvivere in presenza di trastuzumab, fra cui quello di incrementare la produzione di altri recettori per i fattori di crescita sia della famiglia EGFR/HER sia di altre famiglie, come il recettore per il fattore di crescita insulino-simile 1 (IGF-1). Le cellule possono anche perdere o inattivare il gene oncosoppressore chiamato *PTEN*. Questo gene normalmente blocca una via biochimica di sopravvivenza che comprende l'enzima fosfatidilinositol 3-chinasi (PI3K), che permette alle cellule danneggiate di ignorare i segnali che le inducono a suicidarsi. Abbiamo anche identificato cellule che perdono o disabilitano il sito extracellulare sul recettore HER2 a cui si lega il trastuzumab.

Alla luce di queste osservazioni, diventa prioritario identificare ulteriori bersagli molecolari nelle cellule che producono quantità eccessive di HER2 e nell'80 per cento dei tumori che non presentano mutazioni in *HER2*.

Espandere l'arsenale

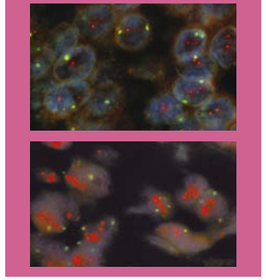
Fra i più promettenti dei nuovi bersagli c'è il recettore per IGF-1 e le molecole di ormone della crescita che lo attivano, IGF-1 e IGF-2. Alti livelli ematici di IGF-1 sono stati associati a un maggiore rischio di tumore al seno, e diversi studi, clinici e di laboratorio, hanno chiamato in causa il suo recettore relativamente allo sviluppo, al mantenimento e alla progressione di vari tipi di tumore. I segnali inviati dal recettore per IGF-1 regolano un gran numero di processi cellulari, tra cui crescita, mobilità e protezione dall'apoptosi. Si è infatti dimostrato che questi segnali proteggono le cellule tumorali dagli effetti della chemioterapia e della radioterapia. Viceversa, si è anche scoperto che l'inibizione dell'attività del recettore per IGF-1 durante la radioterapia o la chemioterapia incrementa il tasso di apoptosi di cellule tumorali in modelli animali.

Oltre a studiare l'inibizione del recettore per IGF-1 come strumento terapeutico, gli scienziati stanno esaminando modi diversi di applicarla per prevenire o invertire la resistenza ad altre terapie, come quelle endocrine, il trastuzumab e il lapatinib. Lo scambio di segnali che si verifica tra il recettore per IGF-1 e i diversi recettori per i fattori di crescita – tra cui l'estrogeno, HER2 e altri EGFR – è un meccanismo cruciale per la crescita e la sopravvivenza del tumore della mammella. L'ipotesi è che questa dipendenza da un codice e la comunicazione per vie biochimiche intercellulari diverse abbiano un ruolo primario nella resistenza ai farmaci.

Il nostro gruppo, per esempio, ha dimostrato che bloccando il recettore per IGF-1 con un anticorpo monoclonale si ripristina la sensibilità di cellule resistenti al trastuzumab e allo stesso tempo si distrugge l'interazione fra i recettori per IGF-1 e HER2. Anche la soppressione del recettore per IGF-1 uccide le cellule resistenti. Per di più, sembra che il lapatinib abbia effetti di tipo inibitorio sul processo di segnalazione di IGF-1 nelle cellu-

L'AMPLIFICAZIONE DI HER2

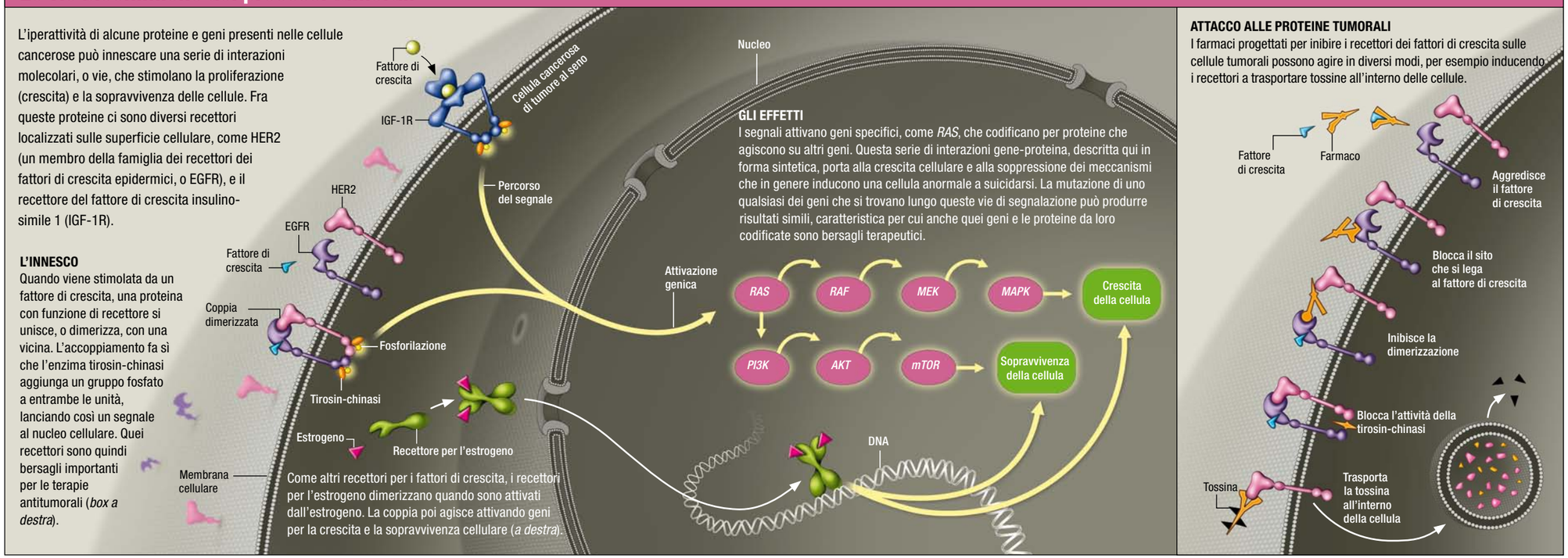
Un gene che codifica per il recettore del fattore di crescita HER2 viene contrassegnato con un marcatore rosso fluorescente in cellule di tumore al seno (*sopra*). Nelle cellule cancerose positive per HER2 (*sotto*) il gene è duplicato moltissime volte, causando la sovrapproduzione di proteine HER2 che provoca un'eccessiva ricezione di segnali di crescita da parte delle cellule.



Jen Christiansen

Cortesia Francisco J. Esteva (*foto*)

Le vie biochimiche dei processi tumorali



Le nuove terapie rivolte contro singole molecole nelle cellule tumorali promettono progressi straordinari

Terapie mirate

Per la cura di pazienti affette da tumore al seno sono stati approvati (*in grassetto*), oppure sono sul punto di essere testati in trial clinici, molti nuovi farmaci che inibiscono specifiche proteine tumorali.

TIPO DI FARMACO
- **Inibitore dell'aromatasi** (blocca un enzima coinvolto nella sintesi dell'estrogeno e del progesterone)
- **Anticorpo monoclonale** (impedisce l'attivazione di recettori cellulari)
- **Inibitore della chinasi** (inibisce i segnali dei recettori cellulari)
- **Vaccino** (stimola la produzione di anticorpi specifici per proteine tumorali; è composto da cellule o peptidi)
- **Altro tipo** (inibitori diretti di altre molecole o terapia genica per alterare la produzione di proteine cellulari)

BERSAGLIO	FARMACO
Recettori proteici per estrogeno/progesterone	**Anastrozolo** **Letrozolo** **Exemestano** **Tamoxifene** **Fulvestrant**
Recettore proteico per HER2	**Trastuzumab** **Pertuzumab** **Lapatinib** NeuVax dHER2 MVF-HER-2 E1A (terapia genica)
Recettore proteico per IGF-1	IMC-A12 CP-751, 871 AMG 479 h7C10 OSI-906
Via biochimica per la sopravvivenza cellulare PI3K/AKT/mTOR	BGT226 BEZ235A RAD001 Rapamicina
Recettore proteico per VEGF (coinvolto nella formazione dei vasi sanguigni tumorali)	**Bevacizumab** Sunitinib Vatalinib Pazopanib AZD2171 AMG706 AMG386 PTC299
Altri bersagli	Dasatinib (inibitore di SRC) THERATOPE Vaccini a base di cellule dendritiche Vaccino per peptide P53 ALT801 (inibitore di P53) Ad5CMV-p53 (terapia genica) Reinfusione di cellule T modificate per aggredire p53 AZD2281 (inibitore proteico di PARP) BSI-201 (inibitore di PARP)

le resistenti al trastuzumab, e questo suggerirebbe che la sua capacità di contenere la proliferazione cellulare può derivare non solo dalle sue attività anti-EGFR/HER2, ma anche dall'inibizione diretta del recettore per IGF-1.

Il groviglio di vie biochimiche che dai recettori descritti porta ai processi cellulari che provocano la divisione di una cellula o la resistenza all'apoptosi, nonostante i danni al DNA, è assai complesso. Tuttavia gli scienziati stanno scoprendo che spesso, nelle cellule tumorali, geni chiave per queste vie biochimiche sono mutati o deregolati. Fra gli esempi caratterizzati meglio c'è il gene *PI3K*, la cui proteina modifica chimicamente un'altra proteina chiamata AKT, che a sua volta altera un complesso chiamato «target della rapamicina nei mammiferi» (mTOR). Questa via biochimica PI3K/AKT/mTOR ha un ruolo di primo piano nell'uso del glucosio da parte dell'organismo per produrre energia e realizzare altri importanti processi fisiologici cellulari, ma è attivata in modo eccessivo e patologico nelle cellule tumorali, prolungandone la sopravvivenza. Poiché nell'organismo gli effetti di questa via biochimica sono ubiquitari, i farmaci che la inibiscono possono distruggere cellule tumorali e cellule sane: un inconveniente che, finora, ha limitato l'uso di queste sostanze.

Tuttavia, diversi inibitori di mTOR sono in fase di sperimentazione in trial clinici sia come singoli principi attivi sia associati con altre terapie. Al momento studi sulla rapamicina, un antibiotico che sopprime il mTOR, suggeriscono che le combinazioni producono effetti antitumorali aggiuntivi rispetto alle singole sostanze, e che, per di più, potrebbe essere una buona idea valutare clinicamente l'inibizione combinata di entrambe le vie.

Un'altra strada molto promettente combina fra loro agenti antitumorali che prendono di mira precisi elementi dell'ambiente tumorale. Durante un processo chiamato angiogenesi, i tumori secernono un gran numero di fattori di crescita per attrarre le cellule endoteliali che generano nuovi vasi sanguigni. Si pensa che la sovrapproduzione del più importante di questi fattori, il fattore di crescita vascolare endoteliale (VEGF), renda i tumori più pericolosi, ed elevati livelli di VEGF sono correlati a tassi di sopravvivenza peggiori nei casi di tumore mammario invasivo.

Il bevacizumab della Genentech è un anticorpo monoclonale diretto contro il VEGF, approvato per la prima volta nel 2004 per la cura del tumore del colon. In trial clinici più recenti eseguiti su pazienti con tumore mammario in metastasi e sottoposti a cure invasive, il bevacizumab somministrato da solo ha mostrato un'attività limitata, ma alcuni pazienti che avevano assunto il farmaco in combinazione con una chemioterapia a base di capecitabina hanno mostrato risposte migliori (si veda *Angiogenesi e cancro*, di Rakesh K. Jain, in «Le Scienze» n. 476, aprile 2008). In un altro studio, un tumore mammario metastatico ma negativo per HER2 è progredito più lentamente in pazienti alle quali era stata somministrata una chemioterapia a base di paclitaxel e bevacizumab rispetto a pazienti che ricevevano solo paclitaxel. Sulla base di questi risultati, l'uso del bevacizumab è stato recentemente approvato per pazienti affette da cancro della mammella, mentre sono in via di sviluppo altri inibitori del VEGF, come il sunitinib della Pfizer, inibitore della tirosin-chinasi che ha per bersaglio il recettore per il VEGF.

Allo stesso tempo, la ricerca di base sta scoprendo nuovi bersagli molecolari che non si limitano a svelare ulteriori informazioni sui meccanismi di questo tumore, ma forniscono anche potenziali tracce per lo sviluppo di farmaci. Terumi Kohwi-Shigematsu del Lawrence Berkeley National Laboratory ha annunciato una scoperta di questo tipo proprio all'inizio del 2008. La biochimica di origini giapponesi ha trovato che il gene *SATB1* regola l'attività di oltre 1000 geni coinvolti nella formazione di metastasi da tumore al seno. Inoltre Kohwi-Shigematsu ha dimostrato che la proteina SATB1 codificata dal gene è necessaria e sufficiente per trasformare le cellule del tumore mammario in metastatiche, caratteristica che la rende attraente dal punto di vista terapeutico. Il suo gruppo di ricerca sta già lavorando a un inibitore della proteina SATB1 che entro pochi anni potrebbe essere pronto per trial clinici.

I progressi nella battaglia molecolare contro il tumore al seno e nelle terapie personalizzate si baseranno sul continuo sviluppo di strumenti in grado di determinare se il tumore di una paziente produce quantità eccessive di proteine come HER2 e SATB1 e di altre proteine che potrebbero essere bersagli farmacologici diretti. In aggiunta, la possibilità di eseguire test genetici contribuirà a caratterizzare gli schemi generali di attività genica di un tumore, una potenziale firma di buona o cattiva prognosi. Altri test già disponibili o vicini all'approvazione aiutano a creare un profilo della paziente in modo da stabilire se presenta varianti genetiche per cui il suo organismo assimila un farmaco più lentamente della media, situazione problematica con un farmaco come il tamoxifene, che per la sua conversione in forma attiva dipende dal metabolismo.

Nel frattempo, sono necessari ulteriori trial clinici su diverse combinazioni farmacologiche per validare l'efficacia di una strategia che aggredisca bersagli multipli. Negli Stati Uniti, per esempio, di recente è iniziato il reclutamento per un trial che coinvolge 50 paesi e che ha l'obiettivo di testare su 8000 pazienti il lapatinib e il trastuzumab sia singolarmente sia in combinazione tra loro e con chemioterapie di tipo tradizionale (*si vedi il box in questa pagina*).

Un trial internazionale tanto vasto è un esempio delle notevoli risorse e dell'attenzione per la ricerca sul tumore al seno, un riconoscimento dell'importanza che viene attribuita a questo tumore come minaccia globale per la salute delle donne. La ricerca senza sosta e una maggiore consapevolezza delle donne stanno dando i loro frutti. Se confrontiamo il tumore al seno con altri tipi di tumore come, per esempio, quelli ai polmoni o al cervello, ci rendiamo conto di quanto siano impressionanti i progressi compiuti nei dieci anni passati. La capacita dei medici di ottenere il profilo di un tumore e di personalizzare la terapia con un numero crescente di armi sta già facendo la differenza. E i prossimi dieci anni promettono progressi ancora più straordinari. ■

Un potere globale

Le terapie mirate saranno più potenti, in linea di principio, quando verranno usate insieme in combinazioni adattate alle caratteristiche tumorali che controllano il cancro in ogni singolo paziente. I trial clinici eseguiti per provare specifiche combinazioni di farmaci forniscono informazioni fondamentali a proposito della terapia più efficace nei confronti di ciascun profilo tumorale, e rivelano interazioni inaspettate fra i vari farmaci. I trial, però, richiedono tempo, spesso anni, per arruolare un numero sufficiente di partecipanti in modo da produrre risultati statisticamente significativi. Ecco perché consorzi di ricerca multinazionali con sede in Europa e negli Stati Uniti stanno unendo le forze per realizzare un trial che coinvolge 50 paesi, chiamato Adjuvant Lapatinib and/or Trastuzumab Treatment Optimization Study (ALTTO), che, negli Stati Uniti, ha appena iniziato la fase di reclutamento.

I centri di sperimentazione saranno circa 1500, di cui una trentina in Italia, e tratteranno pazienti in uno stadio precoce di tumore al seno che produce HER2 in eccesso (stadio I o II), somministrando una chemioterapia abbinata a trastuzumab o lapatinib da soli, o uno di questi due farmaci seguito dall'altro, o entrambi i farmaci insieme. Il trial fornirà il primo confronto in parallelo fra queste due terapie centrate su HER-2 che funzionano con meccanismi diversi.

Con l'obiettivo di coinvolgere circa 8000 donne di sei continenti, il trial ALTTO è potenzialmente in grado di produrre in tempi brevi risultati che si potranno applicare a pazienti di ciascun paese. Inoltre questo modello globale di condivisione dei dati metterà in luce le eventuali differenze di risposte alla terapia o di tossicità esistenti fra diversi gruppi etnici, un fenomeno che si osserva con alcuni tipi di chemioterapia, a causa di variazioni genetiche che influenzano il modo in cui i farmaci sono metabolizzati dall'organismo delle pazienti. Disporre di informazioni di questo tipo a proposito delle più recenti terapie mirate aiuterà i medici a personalizzare ulteriormente le cure, adattandole sia al tumore sia al paziente.

➥ Letture

Advances in the Treatment of breast Cancer. Moulder S. e Hortobagyi G.N., in «Clinical Pharmacology & Therapeutics», Vol. 83, n. 1, pp. 23-36, gennaio 2008.

Trastuzumab: Triumphs and Tribulations. Natha R. ed Esteva F.J., in «Oncogene», Vol. 26, n. 25, pp. 3637-3643, 28 maggio 2008.

Molecular Oncology of Breast Cancer. Ross J.S. e Hortobagyi G.N. (*a cura*), Jones and Bartlett, 2005.

Breast Cancer (II edizione). Hunt K.K., Robb G.L., Strom E.A. e Ueno N.T. (*a cura*), Springer, 2008.

Ascesa e declino di Qatna

di Alessandro Canci, Marco Cremaschi e Daniele Morandi Bonacossi

APPLIQUE D'AVORIO d'elefante raffigurante un volto umano ritrovata assieme a centinaia d'intarsi d'avorio nel palazzo della città bassa (XIV secolo a.C.). Gli occhi erano incrostati in calcare (bulbo oculare) e cristallo di rocca (iride).

Cortesia degli autori

Una missione archeologica italiana sta ricostruendo la storia di Qatna, una delle capitali dell'antica Siria, che dopo un lungo periodo di splendore ha vissuto un declino irreversibile causato, oltre che da fattori politico-economici e sociali, anche dall'inaridimento del clima e dalla pressione antropica sul territorio

IN SINTESI

- Da alcuni decenni alla ricerca archeologica si affiancano discipline delle scienze naturali che consentono di ricostruire il rapporto tra le antiche comunità umane e i paesaggi in cui vivevano.
- Un importante esempio di questa interazione tra uomo e ambiente sta venendo alla luce grazie alla missione archeologica dell'Università di Udine nel sito dell'antica Qatna, nell'odierna Siria.
- Circa 4000 anni fa, Qatna era un importante città della Siria. Ma, a partire dal I millennio a.C., il mutamento degli equilibri politici seguito alla conquista assira, l'impatto antropico e una fase climatica secca ne avrebbero segnato il declino fino alla perdita del suo ruolo strategico.

Uno sviluppo interessante e innovativo nell'ambito delle discipline che afferiscono alle scienze naturali è il loro impiego in ambito archeologico. Sempre più spesso agli archeologi si affiancano geologi, botanici e zoologi, che integrano o approfondiscono i risultati della ricerca archeologica per ricostruire un panorama ricco di informazioni sull'uomo e il suo passato.

È opinione comune fra gli specialisti che l'archeologia debba avere un approccio globale alle problematiche che affronta, e che pertanto non debba limitarsi alla descrizione del reperto o dell'insediamento, ma debba risalire al quotidiano vissuto dall'uomo dell'antichità. Quindi diventano strategici i dati che la ricerca geomorfologica e l'archeobotanica offrono sul tipo di ambiente vissuto dall'uomo, sullo sfruttamento ambientale e su eventuali trasformazioni apportate. Allo stesso modo l'archeozoologia chiarisce questioni riguardo allo sfruttamento degli animali, fino a ricostruire, per esempio, insieme all'archeobotanica, le modalità di sussistenza e l'alimentazione di antiche popolazioni.

La dinamica di questa interazione tra uomo e ambiente è uno degli obiettivi della missione archeologica dell'Università di Udine che dal 1999 conduce scavi nel sito di Mishrifeh, corrispondente a quello che, circa 4000 anni fa, era uno dei più importanti centri politici e commerciali della Siria: Qatna.

L'antica Qatna

La città di Qatna sorgeva nei pressi dell'odierna cittadina di Mishrifeh, circa a metà della via che unisce, da sud a nord, Damasco e Aleppo, i due maggiori centri urbani della Siria moderna.

L'area di scavo interessa un *tell*, la collina artificiale tipica del paesaggio archeologico del Vicino Oriente, che si sviluppa verticalmente a causa di successivi insediamenti edificati nel tempo sulle rovine degli abitati precedenti. Mishrifeh ha ospitato, quasi regolarmente e per migliaia di anni, comunità umane succedutesi una all'altra fino all'epoca moderna. Nel 1982 la Direzione generale delle antichità e dei musei di Siria, ritenendo l'area archeologica sottoposta a un grave rischio di distruzione proprio a causa dell'abitato moderno, ne ha disposto l'esproprio e ha indirizzato la successiva ricostruzione in un luogo poco distante allo scopo di permettere l'indagine archeologica.

Mishrifeh era nota già attorno alla metà dell'Ottocento come un'area che ospitava rovine risalenti all'antichità, ma è solo a partire dal 1924 che vengono avviate le prime esplorazioni archeologiche sistematiche a opera del conte francese Robert du Mesnil du Buisson. I risultati di quelle indagini e di studi successivi, sia sulle tavolette cuneiformi rinvenute da du Mesnil du Buisson nel palazzo dei re di Qatna, sia sulla documentazione epigrafica ester-

na al sito, come le lettere provenienti dall'archivio reale di Mari, una delle grandi capitali regionali della Siria, situata lungo il corso dell'Eufrate, hanno permesso di identificare Mishrifeh con Qatna, uno dei centri strategici per l'esercizio del potere politico ed economico nella Siria del II millennio a.C.

Ancora oggi Mishrifeh, o meglio l'antica Qatna, ha un aspetto imponente. Misura infatti 110 ettari in estensione ed è circondata da grandi terrapieni che raggiungono un'altezza di 15-20 metri, in cui si aprono quattro grandi porte, situate quasi al centro di ogni lato, che permettono l'ingresso alla città. Attualmente questo enorme insediamento è stato esplorato archeologicamente solo per il 5-10 per cento della sua superficie. L'acropoli, che si trova su un ripiano calcareo, è l'area in cui si sono concentrate più intensamente le operazioni di scavo, mentre ai suoi piedi si estendono i 70 ettari della città bassa, ancora in larga misura sconosciuta. Infine, un'ulteriore altura artificiale, la *Coupole de Loth*, domina il lato sud-orientale della città.

Le indagini stratigrafiche e le datazioni radiometriche hanno permesso di accertare che le prime deboli tracce di occupazione umana a Mishrifeh risalgono alla fase finale del tardo Calcolitico (circa 3300-3100 a.C.). Durante il successivo III millennio a.C., corrispondente all'Età del Bronzo antico, la presenza dell'uomo a Mishrifeh diventa più regolare ed evidente con l'edificazione di un primo nucleo urbano. Ma è soprattutto nel corso delle Età del Bronzo medio e tardo, nell'arco del II millennio a.C., che l'insediamento, trasformatosi in una vera e propria metropoli, nota da allora come Qatna, vive il momento di massima espansione urbana e di rilevanza politica, economica e militare.

L'Età del Ferro, tra il 900 e 550 a.C., vede diminuire la supremazia strategica di Qatna, che perde l'indipendenza, pur rimanendo un importante centro amministrativo e manifatturiero dipendente probabilmente dal regno di Hama. Alla fine dell'Età del Ferro, la decadenza di Qatna è ormai inarrestabile, e si concluderà con l'abbandono della città, che sarà rioccupata solo molto più tardi, verso la metà del XIX secolo, con l'edificazione di un nuovo villaggio sulle antiche rovine.

Dai boschi alla steppa

Esaminando le immagini satellitari della Siria centrale e le attuali mappe della vegetazione, si nota che il territorio in cui si trova Mishrifeh rappresenta una sorta d'interfaccia ecologica tra *habitat* essenzialmente mediterranei e contesti ambientali via via più aridi.

Lungo le coste del Levante c'è una dominanza del bosco mediterraneo, consistente in querce, olivi, mandorli, fichi e pistacchi, che prosperano grazie a un regolare regime di piogge garantito dalle catene montuose del Libano e dell'Antilibano. Oltre i monti e a est, invece, si delinea un progressivo inaridimento del territorio, causato dalla ridotta piovosità, che provoca una trasformazione dell'*habitat* vegetale mediterraneo in una foresta stepposa a querce, ginepri dispersi e pistacchio, che degrada poi in un ambiente ancora più arido, dominato dalla steppa con presenza diffusa di cespugli di *Artemisia*. L'ambiente si inasprisce ulteriormente procedendo verso oriente, e cioè verso la steppa semiarida e il deserto vero e proprio che dalla regione di Palmira si estende verso l'Iraq.

La decisione di ubicare un primo insediamento proprio nell'area di Mishrifeh non fu casuale. Le motivazioni della scelta furono senz'altro legate alla presenza di una disponibilità d'acqua garantita dalla presenza di numerosi *wadi*, i corsi d'acqua stagionali, e risorgive carsiche che assicuravano al territorio rifornimenti integrativi dell'apporto pluviale medio annuo (400-600 millimetri).

Uno degli obiettivi della ricerca condotta dalla missione archeologica dell'Università di Udine a Mishrifeh è stato quello di ricostruire le strategie con cui l'uomo ha interagito con l'ambiente e quanto queste hanno contribuito all'evoluzione dell'insediamento e alla trasformazione del paesaggio. Le analisi micromorfologiche dei campioni di sedimenti, condotte da Mauro Cremaschi e Luca Trombino (dell'Università di Milano) con lo studio microscopico di campioni provenienti da una dolina carsica presso il sito di Mishrifeh hanno consentito di accertare l'esistenza di un'importante attività di deforestazione del querceto al limite della steppa e della foresta fluviale già a partire dall'Olocene antico o medio (9000-3000 a.C.). Questa attività, per la quale disponiamo di testimonianze archeologiche relative al Levante a partire dal Neolitico preceramico (IX millennio a.C.), probabilmente era correlata all'esigenza di disporre di ingenti quantità di legno impiegato come materiale combustibile per la produzione di calce, che era usata in abbondanza per intonacare muri e pavimenti degli edifici. Ci troviamo, dunque, di fronte alle prime conseguenze di quel pesante impatto antropico che l'ambiente subirà nel corso delle epoche successive.

Come già anticipato, la prima occupazione dell'uomo a Mishrifeh risale alla fase finale del IV millennio a.C., ma è dall'Età del Bronzo antico III (2800-2500 a.C. circa) e IV (2500-2000 a.C.) che la presenza umana diventa stabile: prima sotto forma di un villaggio, poi di una città, edificati sulla sommità di una terrazza di modesta altezza alla confluenza di due wadi.

Lungo le rive di un antico lago

Un risultato interessante, e significativo per le sue implicazioni, è quello ottenuto dai numerosi carotaggi eseguiti attorno a Mishrifeh, che, grazie allo studio dei sedimenti rinvenuti, hanno permesso di dimostrare l'esistenza di un lago, lungo la cui riva orientale fu costruito l'abitato. La formazione di questo invaso, oggi prosciugato ma allora esteso per una settantina di ettari, è forse in parte artificiale, e coincide con lo sviluppo del primo centro urbano nel corso del Bronzo antico IV.

Questo suggerisce una sorta di gestione della «risorsa acqua» proveniente da alcune risorgive carsiche e da un corso d'acqua perenne, che si concretizzò nella creazione di un bacino per la raccolta dell'acqua, in modo di disporre di una riserva idrica permanente che garantisse la possibilità di avviare e mantenere un'agricoltura e un allevamento di bestiame più efficienti e produttivi. È un passaggio molto importante, che accompagna l'evoluzione di Mishrifeh da villaggio a quella di una città di medie dimensioni, e pone le basi per quella che, nel II millennio a.C., diverrà una realtà sociale, economica e politica più complessa.

L'analisi dei pollini intrappolati nei sedimenti condotta da Verushka Valsecchi, dell'Università di Berna, ha permesso di ricostruire in dettaglio l'evoluzione della vegetazione attorno a Mishrifeh e la tipologia delle coltivazioni che il piccolo lago contribuiva a mantenere. In particolare, lo studio di campioni di polline ha messo in evidenza la presenza delle prime coltivazioni cerealicole attorno al villaggio e la dominanza, tra il 2000 e il 1700 a.C., di una foresta rada di ginepro, probabilmente usato, come accadeva nelle fasi più antiche per il querceto, a uso combustibile.

Alle indagini archeobotaniche si sono affiancati anche i risultati dello studio di resti animali ritrovati nei vari settori di scavo. L'analisi archeozoologica condotta da Emmanuelle Vila e Lionel Gourichon, della Maison de l'Orient et de la Méditerranée del CNRS di Lione, ha evidenziato nel Bronzo antico IV un consumo di risorse animali provenienti principalmente da allevamenti di ovicaprini (*Ovis aries* e *Capra hircus*), bovini (*Bos taurus*) e suini (*Sus domesticus*).

Nell'attività di sussistenza connessa alle risorse animali, la caccia occupa invece un posto di

REGNI DEL VICINO ORIENTE. Nella mappa, la localizzazione geografica di Qatna e delle altre capitali regionali della Siria antica.

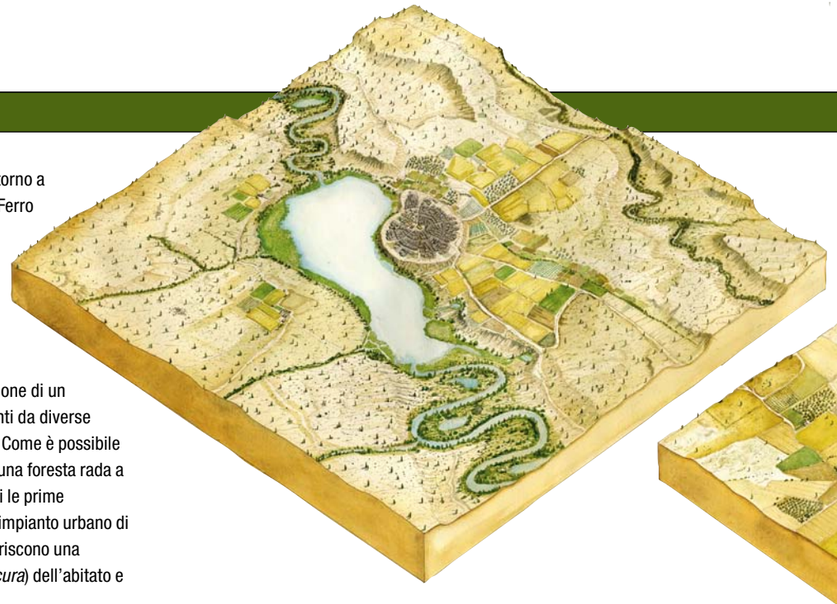
PIANTA QUADRATA. In questa foto aerea è possibile osservare l'impianto quadrangolare della città di Qatna nel II millennio a.C., determinato dalle fortificazioni a terrapieno. Al centro dei terrapieni si notano i grandi varchi delle porte.

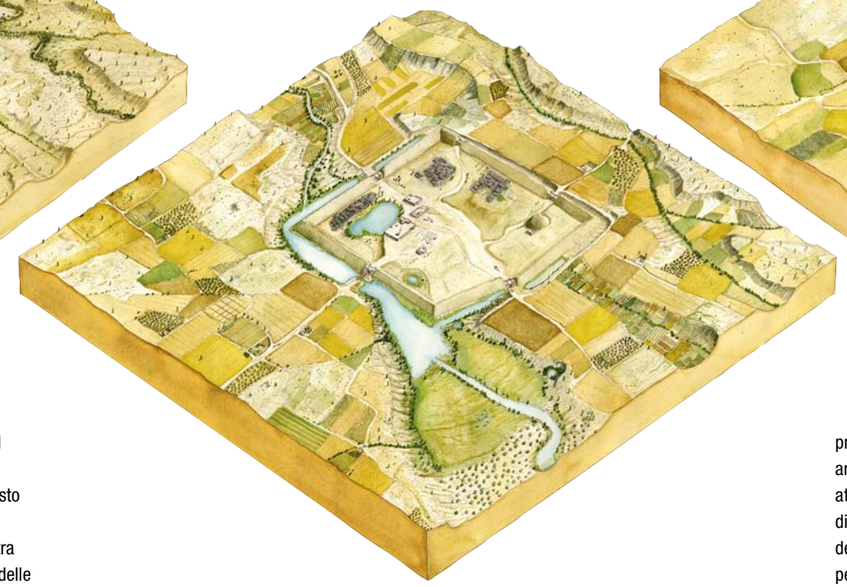
Cortesia Università di Udine (2);

I PROGETTI E GLI SPONSOR

Un'occasione per presentare i risultati del dialogo tra scienze naturali e scienze storiche (l'archeologia) è stata il convegno internazionale organizzato dall'Università di Udine nel 2004, i cui atti sono stati recentemente pubblicati e di cui questo articolo è una sintesi. Il convegno e il successivo volume prodotto sono dedicati al rapporto tra uomo e ambiente nella regione dell'antica città di Qatna, l'odierna Mishrifeh, dove il Dipartimento di storia e tutela dei beni culturali dell'Università di Udine conduce scavi archeologici da un decennio. La ricerca italiana opera grazie a una missione congiunta con il governo siriano diretta da uno degli autori di questo articolo, Daniele Morandi Bonacossi, e da Michel al-Maqdissi della Direzione generale delle antichità e dei musei di Siria. La missione italiana è finanziata dall'Università di Udine, dalla Fondazione Cassa di Risparmio di Udine e Pordenone, dal Ministero degli Affari Esteri e da sponsor privati – la catena di ristoranti «Mille e una Notte» – che, in questi difficili anni, caratterizzati da pesantissimi tagli alla ricerca, si assumono l'onere di sostenere un progetto scientifico articolato e finanziariamente impegnativo quale quello qui presentato. Tuttavia, l'insufficienza dei fondi si sta facendo sentire in misura ormai allarmante, ed è auspicabile che in futuro nuovi sponsor si aggiungano a quelli già presenti per permettere il regolare svolgimento delle annuali campagne di scavo archeologico e restauro della missione dell'Università di Udine a Qatna. Nello stesso sito opera anche una missione archeologica congiunta siro-tedesca, coordinata da Michel al-Maqdissi e Peter Pfälzner, dell'Università di Tubinga.

L'uomo, la città, il territorio





Queste tre ricostruzioni preliminari del territorio attorno a Mishrifeh dall'Età del Bronzo antico IV all'Età del Ferro illustrano molto chiaramente l'impatto antropico sull'ambiente naturale.

Età del Bronzo antico IV (*a sinistra*). La localizzazione del sito urbano era probabilmente legata all'esigenza degli abitanti di disporre di una riserva d'acqua permanente. I risultati dell'indagine geomorfologica e archeologica suggeriscono la creazione di un invaso artificiale per la gestione delle acque provenienti da diverse risorgive carsiche e da un corso d'acqua permanente. Come è possibile notare nella ricostruzione, il paesaggio è dominato da una foresta rada a ginepro e quercia, mentre attorno alla città sono visibili le prime coltivazioni a cereali, vite e olivo. La ricostruzione dell'impianto urbano di Mishrifeh è in parte ipotetica. I dati archeologici suggeriscono una morfologia approssimativamente circolare (*area più scura*) dell'abitato e un'estensione di circa 25 ettari.

Età del Bronzo medio e tardo (*al centro*). La costruzione dei terrapieni modifica vistosamente l'impianto urbano. Si notano i palazzi costruiti sull'acropoli e nella città bassa settentrionale, l'insediamento (*più scuro*) e un acquitrino interno alla città alimentato da una risorgiva carsica. All'esterno l'area umida, modificata dalla costruzione dei bastioni, si riduce a un ampio fossato e a un'area a pascolo di prato allagato a carattere stagionale; si osservi, inoltre, il forte aumento in numero ed estensione delle coltivazioni.

Età del Ferro (*a destra*). Le informazioni archeobotaniche sono piuttosto scarse, ma i risultati dell'indagine geomorfologica suggeriscono un progressivo inaridimento del suolo a causa di una probabile sinergia tra impatto antropico e mutamenti climatici, in particolare una riduzione delle precipitazioni. Il paesaggio diviene più aperto, e dominato da cespugli e arbusti; la zona umida si impaluda. La città, che mantiene la tradizionale attività di sussistenza basata sulle coltivazioni cerealicole unita a una diffusa presenza di vigneti, ospita un quartiere con edifici amministrativi e dedicati allo stoccaggio dei prodotti agricoli. Altri edifici, forse impiegati per la lavorazione tessile, sono visibili presso la porta sud e sull'acropoli.

Disegni di G. Albertini; elaborazione delle immagini di R. Denti e A. Buscaglia

A partire dal II millennio a.C., da centro di medie dimensioni Qatna si avvia a diventare una delle capitali regionali della Siria antica

secondo piano. Le specie identificate forniscono tuttavia significative informazioni proprio sull'importanza del ruolo svolto dal piccolo lago di Mishrifeh anche per la fauna selvatica.

Nel record faunistico selvatico compaiono infatti l'uro (*Bos primigenius*), il progenitore del bovino domestico, la gazzella (*Gazella* sp.) e l'emione (*Equus hemionus*), una specie di asino selvatico molto diffusa nel Vicino Oriente durante l'antichità. Anche l'avifauna è rappresentata, con i resti ossei di ganga (*Pterocles alchata*), un uccello attualmente estinto nel Levante. È interessante ricordare la presenza fra i resti animali di specie tipiche della steppa arida e semiarida, quali l'emione, la gazzella e la ganga, che sottolineano il ruolo del lago come catalizzatore della fauna dell'area.

Una corona di villaggi

Per quanto riguarda l'insediamento, come si è detto, durante la seconda metà del III millennio l'occupazione del sito si evolve verso un centro più ampio e articolato. I resti archeologici indicano la presenza di un abitato urbano di forma approssimativamente circolare, con una probabile estensione stimata in circa 25 ettari.

La nuova città ospita verosimilmente un maggior numero di abitanti, ma anche grandi strutture specializzate, destinate alla lavorazione e allo stoccaggio di prodotti agricoli, localizzate al centro dell'abitato. I ricchi materiali provenienti da una tomba multipla scavata nel corso delle campagne archeologiche di du Mesnil du Buisson suggeriscono la presenza di un'élite urbana, che probabilmente gestiva l'accumulo centralizzato del raccolto sotto forma di tassazione e la sua ridistribuzione ad alcuni settori della popolazione.

Un altro elemento di particolare interesse che getta luce sull'organizzazione delle attività di sussistenza nel territorio attorno a Mishrifeh proviene dai risultati della ricognizione archeologica nell'area. Quest'indagine ha rivelato l'esistenza di almeno 17 insediamenti di piccole dimensioni (uno o due ettari di estensione), distribuiti lungo il corso di due wadi (Wadi Slik e Wadi Mydan) con estrema regolarità. Questa rete di villaggi agricoli disposti a corona attorno a Mishrifeh testimonia un forte sfruttamento agricolo del territorio, basato, come dimostrano le analisi archeobotaniche di Mauro Rottoli (dei Civici Musei di Como) e Leonor Peña-Chocarro (del Consejo Superior de Investigaciones Científicas di Madrid), soprattutto sulla coltivazione di cereali (orzo e grano), integrata dall'orticoltura, dalla raccolta di uva e olive e dalla produzione animale (carne, latte e derivati).

I prodotti dell'attività di questi siti satellite erano probabilmente convogliati a Mishrifeh, che si trovava al centro della rete di insediamenti, e che aveva ormai assunto le funzioni e le dimensioni di una vera e propria città.

Da centro agricolo a capitale

L'inizio del II millennio a.C. segna una svolta cruciale nel destino di Mishrifeh. La fiorente economia agricola e quella basata sull'allevamento, l'aumento del numero di abitanti del centro urbano, ma anche la posizione geografica del sito lungo gli itinerari commerciali che collegavano da est a ovest la Mesopotamia e il Golfo Persico con il Mediterraneo e, da sud a nord, la regione del delta del Nilo e la costa levantina con l'Anatolia, furono condizioni che dovettero stimolare fortemente la trasformazione e l'ulteriore evoluzione della città.

Secondo una recente ipotesi, il nome di Qatna compare per la prima volta nel racconto di Sinuhe, che descrive eventi occorsi alla fine del regno del faraone Amenemhet I (prima metà del XX secolo a.C.), fondatore della XII dinastia. A partire da questo momento Qatna, da centro urbano di medie dimensioni, si avvia a diventare una capitale regionale della Siria, con importanti legami politico-economici con le altre potenze mediterranee, come Aleppo, Hazor (Palestina), l'Egitto e Creta, od orientali, come Mari, presso l'attuale confine con l'Iraq e, più a est, l'Assiria e Babilonia.

Dal punto di vista archeologico, il cambiamento più evidente nell'organizzazione urbana della città è la costruzione, avvenuta verosimilmente durante le prime fasi del Bronzo medio (2000-1600 a.C. circa), di quattro enormi terrapieni, che delimitano un'area di 110 ettari e raggiungono un'altezza di 20 metri. Queste imponenti strutture avevano un significato principalmente difensivo, in quanto le loro dimensioni scoraggiavano un assedio, rendendo inefficaci le batterie di arcieri e impedendo l'uso di macchine da assedio (arieti e torri).

I terrapieni erano collegati con l'esterno da quattro porte, forse sorvegliate da cinque forti posti sulla loro sommità e citati in una tavoletta cuneiforme rinvenuta nel più tardo «palazzo della città bassa» con il nome accadico di *bit abullim* («casa della grande porta»). Il testo cita per l'Età del Bronzo tardo (circa 1600-1200 a.C.) un contingente di quasi 500 soldati a protezione dei cinque *bit abullim* della città.

Un'ulteriore interpretazione, che integra quella legata al ruolo militare dei terrapieni, riguarda la valenza simbolica e il messaggio di maestosa potenza che trasmettevano queste fortificazioni. In

GLI AUTORI

ALESSANDRO CANCI è dottore di ricerca e professore a contratto di paleoantropologia all'Università di Udine. È biologo e antropologo fisico della missione archeologica dell'Università di Udine a Mishrifeh.
MAURO CREMASCHI è professore straordinario di geografia fisica e geomorfologia all'Università di Milano. Le sue ricerche hanno riguardato diversi aspetti della geologia del quaternario e lo studio dei cambiamenti ambientali e della geoarcheologia.
DANIELE MORANDI BONACOSSI è professore associato di archeologia del Vicino Oriente antico all'Università di Udine e direttore della missione archeologica dell'Università di Udine a Mishrifeh. Ha condotto scavi e ricognizioni archeologiche in Siria, Oman e Yemen, occupandosi in prevalenza di archeologia dei paesaggi e di società complesse fra il tardo Calcolitico e l'Età del Ferro.

altre parole, strutture straordinariamente monumentali dal punto di vista architettonico, come i bastioni di Qatna o quelli di Ebla o Hazor, visibili anche da grande distanza, facevano parte di un «paesaggio di potere» che veicolava un'idea di potenza, indistruttibilità e opulenza grazie a cui le élite dominanti comunicavano con i loro sudditi, ma che, al tempo stesso, faceva parte del «dialogo» fra gli stessi centri di potere della Siria.

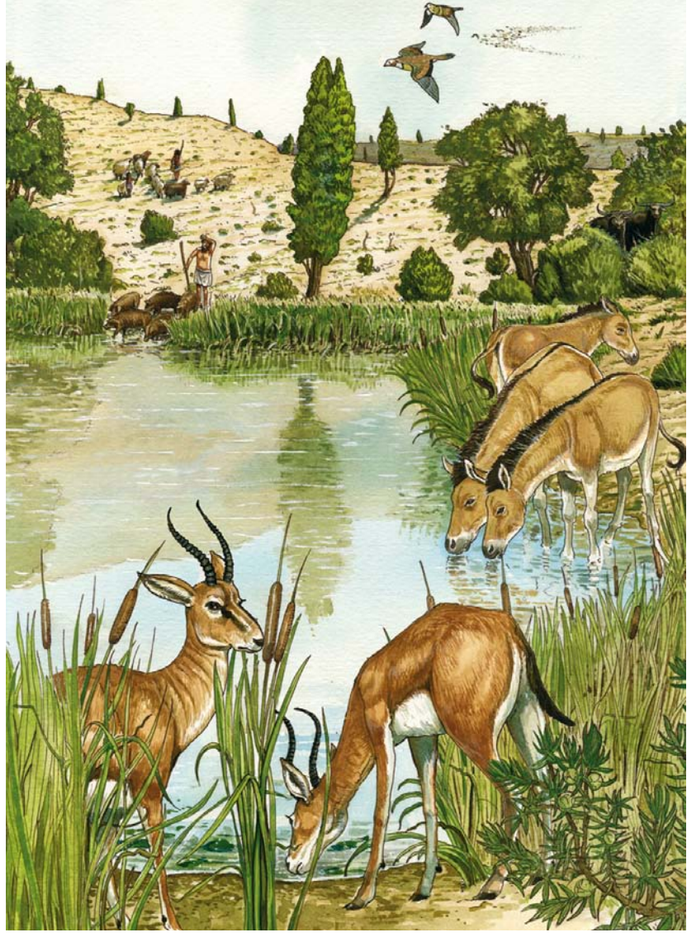
In questa chiave politica è possibile spiegare anche la straordinaria monumentalità architettonica di alcuni edifici dell'area urbana. Ne sono esempi il palazzo reale, edificato alla fine del Bronzo medio (intorno al 1600 a.C.), che, con la sua estensione di oltre 16.000 metri quadrati, è il più grande palazzo siriano della metà del II millennio a.C., oppure il cosiddetto palazzo della città bassa, ancora in corso di scavo, ma che misura già ora 2200 metri quadrati di superficie e ha almeno 68 stanze.

Cambiamenti ambientali

La costruzione dei terrapieni modifica in modo vistoso non solo il paesaggio urbano di Qatna, ma anche il suo paesaggio naturale, dominato dal piccolo lago nei pressi dell'abitato. L'invaso, infatti, è suddiviso dal terrapieno occidentale e meridionale in un lungo e stretto fossato, che circonda i lati nord, sud e ovest dei bastioni. All'interno dell'area delimitata dai terrapieni si crea invece un piccolo acquitrino, la cui esistenza è documentata a partire dalla fase tarda dell'Età del Bronzo.

Il Bronzo medio e il Bronzo tardo sono anche le fasi in cui evolvono alcune strategie produttive, come indicato dai reperti archeologici, che testimoniano lo smantellamento dell'area di stoccaggio e lavorazione di cereali ubicata nel Bronzo antico IV sulla sommità dell'acropoli e sostituita, a partire dall'inizio del II millennio, da officine attrezzate per la produzione di massa della ceramica.

A questo proposito, dai livelli del Bronzo medio e tardo di Qatna proviene una testimonianza singolare. Si tratta di un vasta superficie, rinvenuta nell'area destinata alla produzione ceramica, su cui si è conservato un gran numero di orme di piedi umani, che spesso indossavano sandali, appartenenti ad adulti e bambini, frammiste ad altre orme lasciate da un cavallo e da basi di giare. Questa documentazione, del tutto eccezionale, può essere considerata una fotografia della quotidianità lavorativa a Qatna durante il II millennio, che indica l'esistenza, già a quel tempo, del lavoro minorile, e documenta un insolito uso del cavallo, generalmente considerato bene di prestigio o per uso militare ma in questo caso impiegato, forse perché anziano, come animale da soma.



BRONZO ANTICO. L'habitat nei pressi del lago di Mishrifeh durante il Bronzo antico IV doveva essere piuttosto ospitale. L'invaso sorge alle soglie della steppa semiarida; lungo le rive sono visibili canne di *Typha latifolia*, mentre più all'interno si trovano ginepri e querce residuali. La disponibilità d'acqua richiama la presenza di animali selvatici, come queste gazzelle, emioni e ganghe fra i volatili, tutte specie tipiche di ambienti stepposi. Sullo sfondo sono visibili anche animali domestici, il cui allevamento è particolarmente importante durante il Bronzo antico.

Disegno di G. Albertini; elaborazione dell'immagine di R. Denti e A. Buscaglia

Nel II millennio l'economia cerealicola si intensifica, con una maggiore attenzione all'orzo rispetto al più esigente frumento, associata sempre alla coltivazione di vite e olivo. Ne risulta un'attività umana probabilmente di considerevole impatto sul territorio, che porterà a un'evidente, ma non critica, modifica dell'ambiente attorno al 1680 a.C. Questo ultimo aspetto è ben documentato dal diagramma dei pollini, in cui si registra una marcata diminuzione del bosco a ginepro e quercia e un vistoso aumento dell'ambiente aperto con paesaggio erboso e alberi dispersi.

I cambiamenti interessano anche l'area lacustre nei pressi di Qatna, dove, dopo il primo ridimensionamento seguito alla costruzione dei terrapieni, si assiste a una diminuzione del livello delle acque, che ora non superano la profondità di un metro. Questo favorisce il progressivo impaludamento, testimoniato dalla presenza nel diagramma pollinico di una canna invasiva come *Typha latifolia*.

I numerosi resti ossei di uccelli acquatici, recuperati soprattutto nel ricchissimo ipogeo dinastico sotto al palazzo reale, contribuiscono, in quanto eccellenti indicatori ambientali, a descrivere meglio l'evoluzione dell'area umida di Qatna. Emmanuelle Vila e Lionel Gourichon hanno identificato una significativa presenza di oche, come l'oca lombardella (*Anser albifrons*) e l'oca lombardella minore (*Anser erithropus*), oltre a varie specie di anatre di superficie. Queste testimonianze indicano con grande precisione l'esistenza di una zona umida, caratterizzata da aree di acqua aperta a profondità ridotta, che sconfina in un prato allagato, tradizionale area di pastura per gli anseriformi, con livelli d'acqua di pochi centimetri.

TRACCE DEL PASSATO. Qui sopra si possono vedere le stratigrafie dei sedimenti contenenti pollini ottenute perforando il fondo del piccolo lago di Qatna. In alto, i terrapieni orientale e meridionale.

Cortesia degli autori (2)

Per quanto riguarda la produzione animale nelle età del Bronzo medio e tardo, le testimonianze archeozoologiche dimostrano, rispetto a quanto accadeva nel Bronzo antico, una progressiva specializzazione delle specie allevate, rivolta ora allo sfruttamento di ovicaprini, e la scomparsa dell'allevamento del maiale e dei bovini. Secondo Emmanuelle Vila, questo sviluppo è verosimilmente il frutto di una scelta economica che si orienta verso gli ovicaprini perché forniscono la lana, cioè la materia prima dell'industria tessile, in grande espansione nella Qatna del Bronzo tardo.

Elefanti a palazzo

Nel corso della tarda Età del Bronzo l'architettura ha lasciato importanti testimonianze archeologiche a Qatna. Per esempio, dal già citato palazzo della città bassa proviene una serie di intarsi in avorio particolarmente interessanti, perché la materia prima è il preziosissimo avorio di elefante (*Elephas maximus*). Una singolarità, questa, se si pensa che la stragrande maggioranza dell'oggettistica in avorio del Bronzo tardo proviene dal meno pregiato avorio ricavato da denti d'ippopotamo (*Hippopotamus amphibius*), a quel tempo diffuso nei fiumi e nelle zone umide del Vicino Oriente.

La scoperta a Qatna di oggetti in avorio di elefante, probabilmente il prodotto di una manifattura locale di ambito reale, potrebbe suggerire l'allevamento di elefanti sotto la gestione del palazzo. Del resto ci sono prove della presenza dell'elefante asiatico nella Siria del II millennio, come dimostrano i cinque crani, risalenti al XVII secolo a.C., provenienti dagli scavi condotti da Sir Leonard Wolley nel palazzo reale di Alalakh, a ovest di Aleppo. Altre prove arrivano da fonti testuali, che confermano la presenza della specie nella regione e il suo sfruttamento per lungo tempo. Illuminante in questo senso è la narrazione della battuta di caccia all'elefante condotta dal faraone Thutmosi III attorno alla metà del XV secolo nelle paludi di Niya, ampia area umida a nord di Qatna, nella media valle dell'Oronte, oppure, in epoche più recenti, il passo di Strabone che racconta dei 500 elefanti da battaglia tenuti da Seleuco I (358-281 a.C.) nella stessa regione.

L'eventuale allevamento dell'elefante asiatico da parte della dinastia qatnita potrebbe essere interpretato come un'ulteriore ostentazione di quel «paesaggio di potere» che, come sostenuto in precedenza per l'architettura monumentale, rappresentava il linguaggio simbolico del dialogo politico tra i centri di potere e tra essi e i loro sudditi.

Durante il II millennio, dunque, Qatna evolve in un centro politico-economico di primaria importanza, con una produzione agricola diffusa su

un'area sensibilmente più estesa rispetto alle epoche precedenti e con un'attività di allevamento decisamente specializzata, rivolta in particolare alla produzione della materia prima per l'industria tessile. Politicamente, inoltre, Qatna celebra la propria potenza grazie alla monumentalità dei suoi palazzi e delle strutture difensive e l'ampiezza delle sue alleanze militari e delle sue relazioni politiche ed economiche.

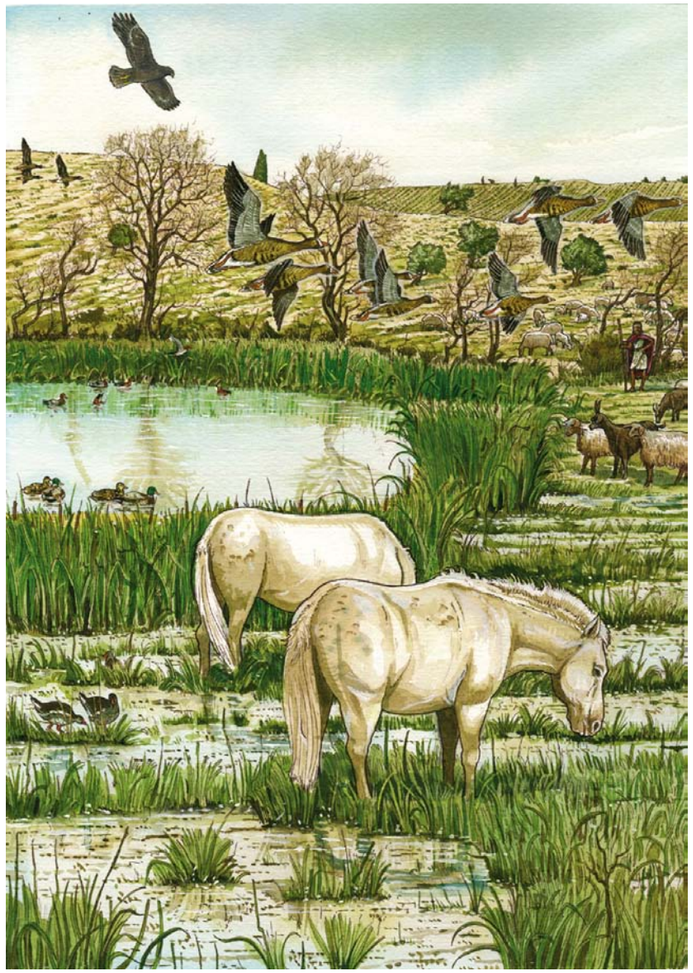
La «città vuota» e la decadenza

Queste osservazioni farebbero pensare che Qatna fosse densamente popolata. I risultati dello studio archeologico, fatta eccezione per la scoperta di un possibile quartiere residenziale nella regione nord-occidentale della città, sembrerebbero però indicare una città scarsamente abitata, almeno per ora. Sebbene siano ancora preliminari e non confortate da sistematiche esplorazioni archeologiche, queste osservazioni suggeriscono l'ipotesi che Qatna fosse una sorta di «città vuota». Un grande contenitore urbano, cioè, che ospitava soprattutto le strutture funzionali al potere politico ed economico, e cioè palazzi, centri amministrativi e militari, luoghi di culto, residenze di funzionari, ma sostanzialmente priva di quartieri abitativi destinati alla popolazione, che era invece dispersa nel territorio, nei siti satellite al di fuori dei bastioni.

Una conferma indiretta in questo senso deriva dal confronto con le testimonianze della prima metà del II millennio a.C. provenienti dalla Siria e dal nord dell'Iraq. La città di Mari, per esempio, finora non ha restituito resti riferibili a quartieri residenziali o a spazi abitativi densamente popolati, mentre i testi parlano di spazi aperti nella città bassa occupati parzialmente da giardini e campi. Per Qatna queste considerazioni contribuiscono a ricostruire una duplice valenza della città: centro di amministrazione del potere, sede della monarchia, di un gruppo dominante e di funzionari d'alto rango e, contemporaneamente, strumento di ostentazione del potere all'interno e all'esterno.

Attorno alla metà del XIV secolo a.C., Qatna inizia la sua fase di decadenza. La ricerca archeologica rivela varie testimonianze in questo senso. Per esempio la distruzione del palazzo reale, causata attorno al 1340 a.C. da un violento incendio, probabilmente conseguenza della conquista della città da parte del re ittita Shuppiluliuma I, il contemporaneo abbandono del palazzo della città bassa e la dismissione di importanti strutture produttive, come l'officina di produzione ceramica, la cui attività viene a cessare dopo oltre mezzo millennio.

La città subisce un significativo ridimensionamento nella sua struttura urbana, politica ed economica nel corso della successiva Età del Ferro (1200-550 a.C.). Dapprima l'antica area urbana assume una dimensione decisamente più «rurale», con semplici abitazioni e probabilmente una scarsa popolazione, ma durante l'VIII e il VII secolo si osserva una nuova fase di occupazione della città un tempo nota come Qatna (il nome, infatti, scompare dai testi durante la fase finale del Bronzo tardo). Nella nuova città compaiono laboratori specializzati nella tessitura e tintura delle stoffe, oltre a decine di silos e fosse per lo stoccaggio di cereali, uva e olive. L'acropoli della città, posta verosimilmente sotto il controllo della vicina Hama, sede di una dinastia reale aramaica, viene nuovamente occupata da un importante edificio, probabilmente destinato a gestire l'attività dell'industria tessile e dell'agricoltura cittadine.



BRONZO TARDO. L'habitat del lago di Qatna durante il Bronzo tardo è mutato. Il prato allagato che, soprattutto d'inverno, caratterizzava la zona umida al di fuori dei terrapieni offriva opportunità di pascolo a varie specie di uccelli acquatici, tra cui l'oca lombardella e l'oca lombardella minore. Si registra anche la presenza di un grande rapace come l'aquila anatraia maggiore (*Aquila clanga*), predatore delle aree umide. Altro interessante aspetto della fauna domestica del Bronzo medio e tardo è l'allevamento dei pregiati cavalli dal manto bianco di Qatna, ricordati nei testi cuneiformi provenienti da Mari.

Disegno di G. Albertini; elaborazione dell'immagine di R. Denti e A. Buscaglia

ARCHITETTURA SIRIANA.
Qui sopra, gli scavi del palazzo reale di Qatna, costruito intorno al 1600 a.C. e, a fianco, gli scavi del palazzo della città bassa.

Cortesia degli autori (2)

Il fattore ecologico

Per quanto riguarda l'ambiente naturale, sfortunatamente il record pollinico è troppo esiguo, e non consente una ricostruzione esauriente dell'*habitat* vegetale. I risultati dello studio geomorfologico evidenziano però una progressiva erosione dei suoli e un decremento della disponibilità di acqua, segnali che suggeriscono un periodo di progressivo inaridimento climatico, analogamente a quanto si rileva nello stesso periodo in altre aree e siti del Vicino Oriente. Infine, come testimoniano nel record faunistico i resti di gazzella, l'ambiente è ora caratterizzato da spazi aperti semiaridi.

Dallo studio dei resti animali emergono altri aspetti interessanti sull'attività di sussistenza di Mishrifeh durante l'Età del Ferro. In primo luogo la presenza della gazzella indica un'accresciuta importanza della caccia. Per quanto riguarda gli animali domestici, si segnalano la ripresa dell'allevamento del maiale e l'uso diffuso di animali da lavoro come il dromedario (*Camelus dromedarius*).

Sulle cause dell'abbandono della città e di molti dei villaggi rurali circostanti attorno alla metà del VI secolo a.C. non ci sono informazioni precise, ma esso va probabilmente inserito nel più ampio contesto delle profonde trasformazioni politiche, economiche e sociali che accompagnarono la disgregazione dei regni luvio-aramaici della Siria, nello specifico del regno di Hamath, in conseguenza della conquista e delle deportazioni assire durante il regno di Sargon II e dell'assorbimento di questi Stati regionali nel nuovo territorio imperiale.

Le indagini paleoambientali a Mishrifeh e nel suo territorio, tuttavia, permettono – anche se solo come ipotesi di lavoro – di introdurre in questo scenario geopolitico una variabile di tipo ecologico. Come si è visto, infatti, i dati indicano nell'Età del Ferro un progressivo inaridimento climatico e un graduale calo delle risorse idriche, accompagnati da marcati fenomeni erosivi locali. Non sono disponibili dati di confronto per l'area centro-siriana, anche se dati provenienti da carotaggi nel Lago di Van e da altri studi consentono di caratterizzare il tardo II e il I millennio a.C. come un periodo di aridità prolungata nel Vicino Oriente.

I dati paleoclimatici provenienti dalla regione di Mishrifeh potrebbero dunque indicare che, nel complesso gioco di cause che portarono all'abbandono del sito e all'almeno parziale spopolamento della regione tra la fine dell'VIII e la metà del VI secolo a.C., non si possa escludere anche un ruolo del fattore ecologico, come conseguenza di una cospicua riduzione della disponibilità idrica e del progressivo impaludamento del lago di Mishrifeh. Questo complesso di fenomeni naturali potrebbe aver rappresentato una delle cause che costrinsero la popolazione di Mishrifeh ad abbandonare il sito.

I risultati presentati in queste pagine rappresentano un esito significativo ma ancora preliminare della ricerca multidisciplinare sulla storia dell'interazione tra uomo e ambiente naturale. Con questa filosofia si sta muovendo anche il nuovo progetto di ricerca dell'Università di Udine, nato come sviluppo degli scavi a Qatna e condotto in collaborazione con l'Università di Milano e la Direzione generale delle antichità e dei musei di Siria, rivolto alla ricostruzione del paleoambiente e della storia dell'insediamento e dell'uso del territorio nella regione semiarida ubicata lungo gli antichi percorsi carovanieri che, da Qatna, raggiungevano l'antica città di Palmira alle porte del deserto arabico. ■

➡ Letture

Urban and Natural Landscapes of an Ancient Syrian Capital. Morandi Bonacossi D. (*a cura*), Forum Editrice, Udine, 2007.

Settlement and Environment at Tell Mishrife/Qatna and its Region. A Preliminary Reconstruction. Cremaschi M., Morandi Bonacossi D. e Valsecchi V., in «Proceedings of the 4th International Congress on the Archaeology of the Ancient Near East», di Kühne H., Czichon R.M. e Kreppner F.J. (*a cura*), Berlino, 2008.

Il sito web della missione archeologica dell'Università di Udine a Mishrifeh: **www.qatna.org.**

Guardiani cellulari

Le proteine heat shock, presenti in ogni cellula, neutralizzano lo stress. Ma si stanno rivelando anche potenziali alleati terapeutici

di Pramod K. Srivastava

Nel 1962, all'Istituto di genetica di Pavia, qualcuno alzò la temperatura di un incubatore che ospitava una colonia di moscerini della frutta (*Drosophila melanogaster*). Quando Ferruccio Rimossa, allora giovane genetista, esaminò le cellule degli insetti che avevano subito lo shock termico notò che i loro cromosomi si erano gonfiati in alcuni punti precisi. L'aspetto «a salsiccia» era il segnale che in quelle regioni c'erano geni che si stavano attivando per produrre le proteine per cui codificavano. Fu così che quei siti di attività vennero definiti *heat shock*, siti di shock termico.

L'effetto era riproducibile, ma all'inizio fu considerato un fenomeno circoscritto al moscerino della frutta. Ci vollero altri 15 anni prima che le proteine generate in seguito alla comparsa dei rigonfiamenti sui cromosomi fossero individuate nei mammiferi e in altre forme di vita. Nel corso di una delle pagine più appassionanti della biologia contemporanea, alle proteine heat shock (HSP) è stato riconosciuto un ruolo centrale in *tutte le espressioni vitali*, non solo a livello di cellule, ma anche di organismi e di intere popolazioni.

Queste molecole onnipresenti, infatti, sono uno dei più antichi meccanismi di sopravvivenza conservati nel corso dell'evoluzione: in realtà, è stato addirittura dimostrato che favoriscono l'evoluzione. Prodotte in risposta a condizioni di stress – tra cui l'elevata temperatura, ma non solo– le HSP aiutano le singole cellule consentendo ai processi cellulari di funzionare regolarmente in situazioni sfavorevoli. Nell'ultimo decennio gli scienziati hanno scoperto che negli organismi superiori, come gli esseri umani, le HSP svolgono anche altri ruoli. Sono parte integrante delle nostre difese immunitarie contro i tumori e i patogeni, perciò potrebbero rivelarsi preziose nello sviluppo di un'ampia gamma di nuovi farmaci e vaccini.

Per capire come sfruttare dal punto di vista terapeutico queste versatili proteine, è utile dare uno sguardo alle diverse strategie con cui eseguono il loro compito principale, che è di fare da *chaperon* ad altre proteine. Un po' come in altri tempi le accompagnatrici delle signorine di buona famiglia, le attività delle HSP hanno due obiettivi: inibire le interazioni indesiderate e promuovere quelle auspicabili, in modo che si formi un legame stabile e produttivo fra le proteine che accompagnano.

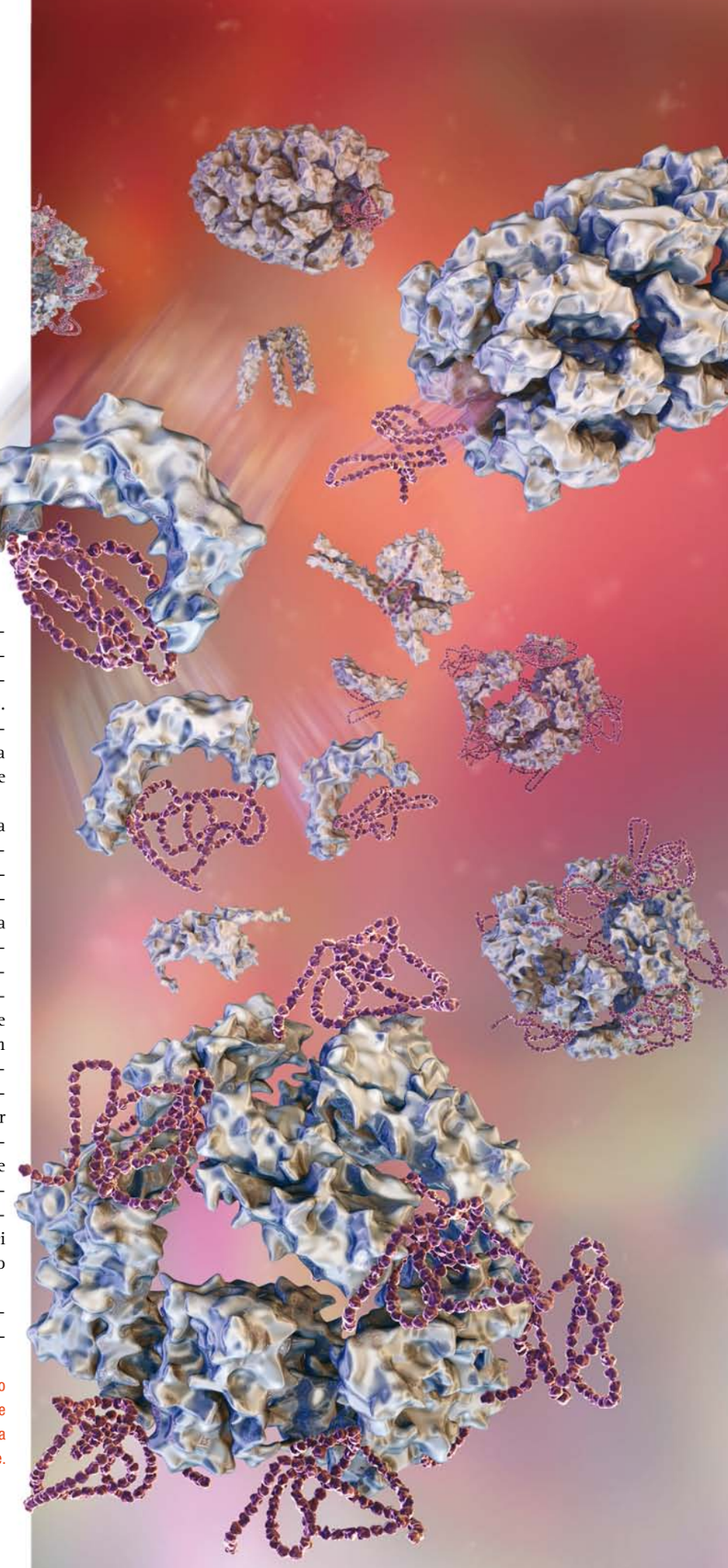
Guardiani versatili

Spesso le proteine situate all'interno di una cellula hanno solo uno o pochissimi «compagni» fidati con cui possono interagire efficacemente: per esempio un recettore e il suo ligando, che si comportano come una serratura e la sua chiave. Il ligando ha scarso effetto su altri tipi di recettore, e quest'ultimo tipicamente è attivato solo dal suo particolare partner o da molecole con una struttura molto simile. Le HSP invece tendono ad associarsi a una vasta gamma di proteine «clienti», il che permette loro di assolvere un vastissimo assortimento di incarichi. Tra questi compiti ci sono diverse attività «ausiliari»: aiutare le catene amminoacidiche di nuova formazione a ripiegarsi nella struttura proteica corretta, disassemblare quelle danneggiate, scortare le proteine fino ai partner designati e tenerle lontane dagli intrusi.

Alcuni esempi specifici possono mettere meglio in luce la rilevanza di questi compiti e illustrare alcune delle modalità con cui operano le più importanti delle HSP. La capacità di una proteina di compiere le funzioni a cui è destinata non dipende solo dal fatto di trovarsi al posto giusto nel momento giusto, ma anche dall'avere la forma corretta. Le catene amminoacidiche di nuova formazione sono soggette a forze di vario tipo che le aiutano ad acquistare la conformazione giusta. Ciascun amminoacido, per esempio, ha una risposta caratteristica all'acqua presente nel citoplasma cellulare. Gli amminoacidi idrofobici la detestano, e cercano di allontanarsene rifugiandosi all'interno della struttura proteica, mentre quelli idrofili preferiscono volgersi all'esterno. Ma questi meccanismi non sono sempre sufficienti ad assicurare il *folding* (il ripiegamento di una proteina) corretto, così vengono coinvolte alcune HSP, come HSP60 (*si veda il box a p. 93*).

La proteina HSP60 ricorda una gabbia formata da numerose molecole ripetute. Il suo margine interno è altamente idrofobico, perciò attrae gli amminoacidi idrofobi esposti di una proteina non ripiegata per legarla a sé. Quando una simile catena è attratta nella gabbia, si trova immersa in un ambiente interno idrofilo che gli amminoacidi idrofobici vogliono evitare a tutti i costi: di conseguenza la molecola intrappolata è costretta a cambiare forma. Questo processo può non avvenire non in un unico passaggio, e la gabbia può liberare e riprendere più volte la proteina prima che acquisisca la conformazione tridimensionale corretta. Per questo, HSP60 è detta anche *foldasi*. Al contrario, la proteina HSP100 è detta *unfoldasi*. Anche HSP100 è un anello costituito da numerose subunità che, in collaborazione con la HSP70, può disassemblare proteine danneggiate o aggregati proteici indesiderati, o addirittura causare lo srotolamento di una proteina completamente ripiegata.

Contrariamente alle proteine heat shock a gabbia, la maggior parte delle HSP non circonda il pro-



Jeff Johnson/Hybrid Medical Animation

LE PROTEINE HEAT SHOCK, cioè da shock termico, sono «guardiani» molecolari che proteggono l'integrità delle proteine aiutandole ad assumere la forma corretta, a collocarsi nei siti giusti e a evitare interazioni indesiderate.

IN SINTESI

- Proteine con funzioni di controllo, presenti in tutte le forme di vita, mantengono il funzionamento regolare e costante di un'ampia gamma di processi cellulari.
- Tramite le diverse interazioni che stabiliscono fra loro, queste proteine raccolgono «impronte digitali» rivelatrici dei contenuti di ciascuna cellula, il che ha consentito loro di sviluppare un ruolo essenziale nelle risposte immunitarie contro i tumori o gli organismi patogeni.
- Fra le terapie che sfruttano le proprietà di queste proteine ve ne sono alcune che tendono a inibire e altre a stimolare le loro diverse funzioni naturali.

prio substrato, ma piuttosto lo «prende sottobraccio». HSP70, per esempio, si lega direttamente a brevi tratti di sequenze amminoacidiche note come peptidi. La molecola ha una fessura che serve a legare il peptide, che si apre quando HSP70 è legata alla fonte di energia cellulare, l'ATP; ma quando l'ATP è assente, una struttura a coperchio che si trova su HSP70 aggancia il peptide legato e intrappola la catena proteica più grande al posto giusto. La capacità di HSP70 di afferrare una gran varietà di peptidi diversi consente alla molecola di accompagnare molti processi cellulari fondamentali, come aiutare le catene di amminoacidi di nuova formazione ad assumere una conformazione matura, facilitare l'assemblaggio di proteine complesse e proteggere le proteine dalla denaturazione alle temperature elevate.

Benché le proteine heat shock siano attive nelle cellule in circostanze normali, è facile immaginare che il loro aiuto possa essere ancora più prezioso in situazioni di difficoltà. In condizioni di emergenza quali temperature elevate o molto basse, mancanza d'ossigeno, disidratazione o carenza di nutrienti, una cellula dovrebbe lottare anche solo per sopravvivere. Un ambiente ostile può degradare proteine essenziali anche se la cellula cerca di produrne dei sostituti. In quelle circostanze, le proteine heat shock potrebbero attenuare lo stress recuperando proteine essenziali, smontando e riciclando quelle danneggiate e in generale facendo funzionare i meccanismi cellulari il più normalmente possibile. Perciò, quando una cellula subisce un forte stress, una delle sue prime risposte sarà produrre più HSP, come constatò per primo Ritossa 46 anni fa.

Questo ruolo fondamentale delle HSP è stato ben documentato fin dalla loro scoperta. A partire dagli anni ottanta, però, si è cominciato a scoprire che le HSP svolgono anche una funzione completamente diversa, altrettanto essenziale per la sopravvivenza degli organismi complessi.

Impronte digitali antigeniche

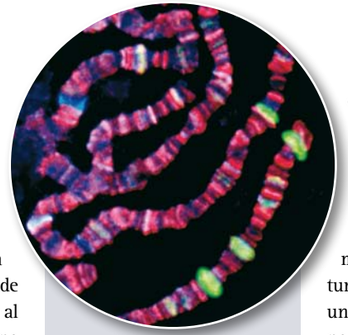
All'inizio degli anni ottanta, da poco laureato, iniziai a interessarmi a un fenomeno noto fin dagli anni quaranta, ma che era rimasto senza spiegazione. Diversi scienziati avevano dimostrato che è possibile immunizzare topi e ratti contro i loro stessi tumori, allo stesso modo in cui animali ed esseri umani sono normalmente immunizzati contro i patogeni. Le proteine provenienti da un organismo patogeno sono riconosciute come estranee dal sistema immunitario dei mammiferi, ed è per questo che agiscono come antigeni, provocando una risposta immunitaria. Un tumore, invece, è costituito da cellule che appartengono all'individuo che ne è affetto, per cui l'elemento antigenico rimaneva un mistero. Incominciai quindi le mie indagini tentando di isolare questi antigeni tumorali specifici.

Durante la ricerca, identificai una proteina, chiamata gp96, che avrebbe potuto effettivamente provocare una resistenza immunitaria ai tumori. A sorpresa, questa molecola risultò essere un membro della famiglia HSP90 – molte proteine HSP si presentano con più forme simili fra loro – che compare sia in tessuti normali sia in cellule tumorali. Due anni più tardi Stephen J. Ullrich e colleghi dei National Institutes of Health fecero, in modo indipendente, un'osservazione simile. Le molecole gp96 trovate nei tumori e nei tessuti normali avevano sequenze di amminoacidi identiche, quindi la gp96 di derivazione tumorale non era tumore-specifica. Quali erano allora le basi della sua capacità di rendere immuni al cancro?

La risposta cominciò a emergere nel 1990, mentre io e Heiichiro Udono, che in seguito lavorò come post-doc nel mio laboratorio alla Mount Sinai School of Medicine, isolando la HSP70 da alcuni tumori per testare se anch'essa era in grado di produrre immunità contro il cancro, scoprimmo che poteva farlo. La sorpresa maggiore però l'avemmo quando sottoponemmo HSP70 a un processo di purificazione finale denominato cromatografia di affinità per l'ATP, e la potentissima attività immunizzante della molecola verso il tumore sparì!

Capimmo subito che l'esposizione di HSP70 all'ATP stava provocando una perdita di materiale nella proteina, materiale che stabilimmo essere di natura peptidica. Negli anni seguenti, varie ricerche hanno rivelato che HSP70 cambia conformazione quando si lega all'ATP provocando il rilascio di qualunque peptide legato a essa. In effetti, abbiamo imparato che tutti i membri delle famiglie HSP60, HSP70 e HSP90 trasportano regolarmente peptidi generati all'interno delle cellule. E le HSP70 o HSP90 prelevate da cellule tumorali o da cellule infettate da virus o dalla tubercolosi recano quasi sempre peptidi derivati da antigeni tumorali specifici, da antigeni virali o da antigeni della tubercolosi. Quindi, i peptidi associati alle HSP rappresentano le «impronte digitali antigeniche» delle cellule o dei tessuti da cui provengono.

La caratteristica di alcune proteine heat shock di conservare peptidi che rappresentano la loro cellula d'origine ha assegnato alle HSP un ruolo essenziale in uno dei processi fondamentali del sistema immunitario: il riconoscimento di cellule cancerose o infettate da un virus. I linfociti T riconoscono gli antigeni di queste cellule attraverso un elaborato processo noto come presentazione dell'antigene.



RISPONDERE ALLO STRESS

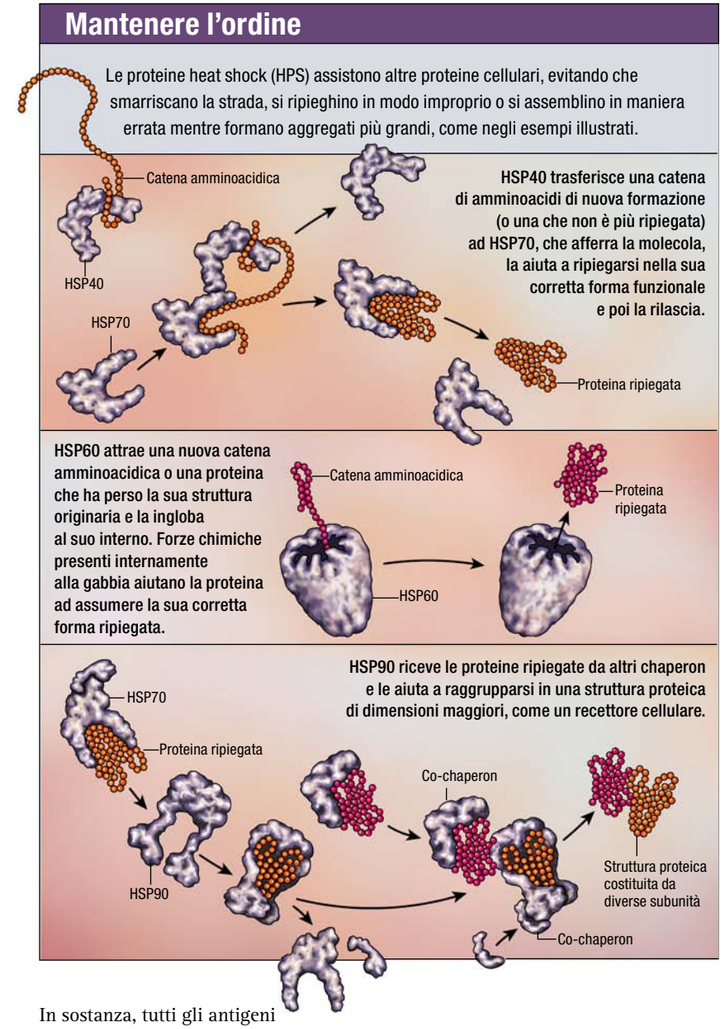
I cromosomi di un moscerino della frutta esposti ad alte temperature si «gonfiano» in regioni contenenti geni che codificano per proteine heat shock (*in bianco e in verde*). Perché una cellula produca queste proteine, il filamento strettamente impacchettato di DNA deve distendersi leggermente, in modo che i geni rilevanti siano accessibili: è questo che provoca l'aspetto «gonfiato» in quelle regioni.

Cortesia dell'autore (*Srivastava*); cortesia J. Werner e J.T. Lis, da «Science», Vol. 301, agosto 2003 (*cromosomi*)

L'AUTORE

PRAMOD K. SRIVASTAVA è professore di medicina e direttore del Center for Immunotherapy of Cancer and Infectious Diseases alla University of Connecticut School of Medicine. Grazie a una serie di scoperte iniziate quando era ancora studente universitario, Srivastava è stato tra i primi a studiare il ruolo delle proteine *heat shock* nel sistema immunitario. Basandosi su queste intuizioni ha fondato una società, la Antigenics, per sviluppare vaccini antitumorali realizzati con le HSP ricavate dai tumori di alcuni pazienti.

Mantenere l'ordine



Jen Christiansen

In sostanza, tutti gli antigeni originati all'interno delle cellule sono degradati in peptidi che poi si associano alle HSP delle famiglie HSP60, HSP70 e HSP90, secondo una sequenza di eventi ancora oscura. I peptidi vengono infine caricati su una speciale classe di proteine, il maggior complesso di istocompatibilità di classe I (MHC-I), ed esibiti sulla superficie della maggior parte delle cellule dei mammiferi. Le cellule T riconoscono i complessi peptide-MHC-I e distruggono quelli che indicano una patologia cellulare (*si veda il box a p. 94*). Il ruolo di guardiane dei peptidi delle HSP è fondamentale per il loro caricamento finale sulle molecole dell'MHC-I; quando le HSP sono silenziate chimicamente, le molecole dell'MHC-I restano senza peptidi, e non possono più essere riconosciute dalle cellule T.

La capacità delle HSP che legano il peptide di fare da chaperon all'antigene è la base della capacità delle HSP derivanti da tumori o da cellule infettate da organismi patogeni di immunizzare contro quegli stessi tumori o contro patogeni endocellulari. I complessi HSP-peptide, però, svolgono anche un altro ruolo critico nel riconoscimento di antigeni amici e nemici da parte delle cellule T, attraverso le loro interazioni con diversi tipi di cellule immunitarie, le cellule che presentano l'antigene.

Dare l'allarme

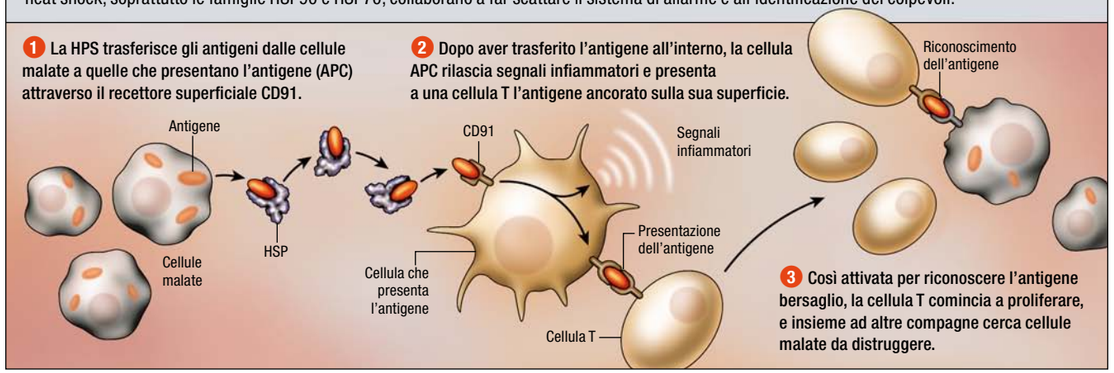
In qualità di sentinelle del sistema immunitario, le cellule che presentano l'antigene sono presenti in ogni tessuto del corpo, dove «saggiano» l'ambiente che le circonda alla ricerca di tutti gli eventuali antigeni. Esse presentano tutto ciò che incontrano alle cellule T, le quali, se necessario, tenteranno di distruggere le cellule tumorali o infette.

Si è scoperto che le cellule che presentano l'antigene trasportano sulla superficie alcuni recettori per le HSP che legano il peptide. Il primo di questi recettori fu identificato da Robert J. Binder, all'epoca studente nel mio laboratorio, e battezzato CD91. Quando le cellule incontrano un complesso HSP-peptide, lo trasportano al loro interno attraverso l'ingresso CD91 e presentano i peptidi portati dalle HSP alle cellule T; in seguito queste possono moltiplicarsi e respingere il tumore o l'organismo patogeno. In linea generale, questo meccanismo spiega perché le HSP isolate da un tumore siano in grado di immunizzare un organismo contro quella patologia tumorale, mentre le HSP isolate da tessuti normali non riescono a ottenere lo stesso risultato.

Oltre a offrire al sistema immunitario una descrizione dell'invasore, sembra che le HSP siano in grado di dare contemporaneamente anche l'allarme. Sreyashi Basu, della University of Connecticut School of Medicine, e io, abbiamo dimostrato che basta esporre le cellule che presentano l'antigene a membri delle famiglie HSP70 e HSP90 per stimolare in esse numerosi cambiamenti, fra cui l'invio di segnali che provocano un'infiammazione (una risposta che è parte integrante di una forte difesa immunitaria). Benché in genere le HSP siano attive all'interno delle cellule, da qualche tempo si è scoperto che quando le cellule dei mammiferi sono sotto stress rilasciano HSP specifiche, o le collocano sulla propria superficie in quantità modeste ma significative. Quindi la capacità delle HSP di attivare le cellule che presentano l'antigene con la loro semplice presenza suggerisce che una comparsa anomala di HSP esternamente alle cellule rappre-

Attivare le risposte immunitarie

Quando una cellula è tumorale o infetta, genera proteine che non si ritrovano in cellule normali. Frammenti di queste proteine possono agire come antigeni, provocando una risposta immunitaria. Prima che ciò accada, però, le cellule immunitarie devono sapere che esiste un problema. Le proteine heat shock, soprattutto le famiglie HSP90 e HSP70, collaborano a far scattare il sistema di allarme e all'identificazione dei colpevoli.



senti un meccanismo per avvertire il sistema immunitario di un imminente pericolo.

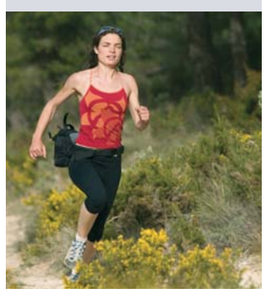
Le mie attuali ricerche sull'uso di complessi HSP-peptide purificati da tumori per stimolare il rigetto tumorale si basano su questa funzione immunizzante, oltre che sulla mia convinzione che il tumore di ogni paziente è unico dal punto di vista antigenico. Ho messo a punto un processo per estrarre peptidi legati alle HSP dal singolo paziente e poi reintrodurli in forma purificata come vaccino che dovrebbe stimolare il sistema immunitario ad attaccare le cellule portatrici degli specifici antigeni associati al tumore.

Questo metodo è stato sperimentato negli Stati Uniti e in Europa in una serie di trial preliminari su esseri umani per vari tumori. Test di efficacia più avanzati su malati affetti da melanoma e tumori renali si sono appena conclusi negli Stati Uniti, in Europa e in Australia. Questi studi hanno dimostrato che i pazienti in cui erano presenti entrambe le patologie, che avevano ricevuto dosi sufficienti di vaccino costituito dal complesso HSP-peptide e la cui malattia era limitata a pelle, linfonodi e polmoni, sono vissuti molto più a lungo rispetto a pazienti che avevano ricevuto cure tradizionali, inclusa la chemioterapia. Nel protocollo sui tumori renali, in alcuni pazienti il vaccino ha prolungato la sopravvivenza senza recidiva di più di un anno e mezzo.

Questi risultati hanno convinto la Russia ad approvare la cura, che è quindi il primo vaccino antitumorale a entrare nella pratica clinica. La richiesta di approvazione sarà presentata tra breve nell'Unione Europea, mentre un'analoga richiesta alle autorità degli Stati Uniti è in attesa di dati ulteriori sui risultati a lungo termine.

STRESS BENEFICO

L'esercizio fisico innalza la temperatura corporea e provoca altre forme di stress sulle cellule di tutto l'organismo, spingendole ad aumentare la produzione di alcune proteine heat shock. Studi preliminari suggeriscono che queste proteine contribuiscano agli effetti salutari dell'esercizio fisico mitigando il danno all'interno delle cellule e avvertendo il sistema immunitario di potenziare la risposta immunitaria complessiva.



Jen Christiansen (*illustrazione*); Anthony West/Corbis (*jogger*)

Un'ampia influenza

Amplificare l'effetto naturale delle HSP sul sistema immunitario usandole nei vaccini non è l'unico modo per sfruttare terapeuticamente queste versatili proteine. Suzanne L. Rutherford dell'Università di Washington e Susan L. Lindquist del Whitehead Institute for Biomedical Research di Cambridge, in Massachusetts, hanno offerto uno sbalorditivo esempio dell'efficacia con cui le HSP assolvono il compito di mitigare le condizioni di stress presenti all'interno delle cellule. Le ricercatrici hanno dimostrato che inibendo il funzionamento della HSP90 nella *Drosophila* si smascherava un gran numero di mutazioni genetiche preesistenti, i cui effetti potenzialmente dannosi erano, in qualche modo, tamponati da HSP90. Rutherford e Lindquist sostengono che in natura esiste una variabilità genetica ampiamente diffusa che potrebbe alterare il funzionamento degli organismi, ma che essa di solito non si manifesta perché è nascosta da HSP90: un effetto che favorisce un tranquillo accumulo di cambiamenti genetici. Quando la funzione tampone è compromessa, per esempio da temperature estreme, emergono tratti diversi, e a quel punto la selezione può agire su di essi. Quindi HSP90, promuovendo la variazione genetica, potenzia l'evoluzione.

Lindquist e collaboratori hanno dato ulteriori prove del ruolo di HSP90 nella rapida evoluzione di nuovi tratti, come la resistenza a farmaci specifici in varie specie di funghi. La ricercatrice ha quindi suggerito che inibitori specie-specifici di HSP90 potrebbero essere usati come una nuova generazione di antibiotici. Analogamente, si ritiene che le HSP facciano da tampone contro l'accumulo di mutazioni che dovrebbero rendere sempre meno vitali le

In fase di sperimentazione

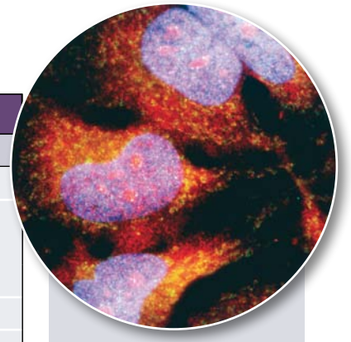
Vari farmaci attualmente sottoposti a trial clinico potrebbero combattere le malattie sfruttando le diverse funzioni delle HSP. Alcuni cercano di inibire le proteine, altri di stimolarne la sintesi, a seconda della patologia e delle HSP utilizzate oppure scelte come bersaglio.

MECCANISMO DI CURA

- **Inibitore delle HSP** (blocca il funzionamento delle HSP che normalmente aiuterebbero una cellula tumorale, oppure infettata da un virus o da un batterio patogeno, a sopravvivere)
- **Stimolatore delle HSP** (calore o sostanze chimiche usate per indurre le HSP del paziente a proteggere un organo durante una terapia, chirurgica e non)
- **Vaccino/Immunoterapia** (complessi antigenici HSP-peptide purificati e poi introdotti nel corpo per stimolare una risposta immunitaria nei confronti di un tumore o di un patogeno)

HSP	TERAPIA (PRODUTTORE)	PATOLOGIA
HSP90	Alvespimycin (Kosan Biosciences)	Tumore al seno
	Tanespimycin (Kosan Biosciences)	Leucemia, linfoma, tumori solidi
	CNF 2024 (Biogen Idec)	
	SNX-5422 mesilato (Serenex)	
	AUY-922 (Novartis)	Tumori solidi
	IPI-504 (Infinity Pharmaceuticals)	Melanoma, tumore alla prostata
	BIIB021 (Biogen Idec)	Leucemia, linfoma, tumori solidi
HSP27	OGX-427 (OncoGenex Technologies)	Tumori solidi
Diverse	Ablazione mediante radioterapia	Melanoma
HSP65	HspE7 (Nventa Biopharmaceuticals)	Cellule cervicali precancerose infettate da papillomavirus umano
HSP70	AG-707 (Antigenics)	Herpes simplex di tipo 2
	HSPPC-70/AG-858 (Antigenics)	Leucemia mieloide cronica
GP96	HSPPC-96/vitespen* (Antigenics)	Tumori solidi

**Approvato in Russia per uso clinico*



Nancy Ketersha/Photo Researchers, Inc. (*microfotografia*)

AIUTANTI PERICOLOSI

Le cellule tumorali, essendo anormali, sono quasi sempre in condizioni di stress, e di conseguenza producono livelli maggiori di proteine heat shock. Si ritiene in particolare che la HSP90 (*in giallo*) aiuti le cellule tumorali a sopravvivere allo stress, proprio come fa con le cellule normali. Inibire gli effetti della HSP90 potrebbe quindi rendere le cellule maligne più vulnerabili alla chemioterapia.

cellule cancerose, ma sembrano invece stimolarne l'aggressività. Poiché HSP90 influenza una gamma di vie biochimiche di comunicazione intracellulare più ampia rispetto ad altre HSP, è probabile che la perdita della sua funzione renda le cellule tumorali più sensibili allo stress e quindi più vulnerabili alla chemioterapia. Di conseguenza sono in fase di sperimentazione su malati di tumore inibitori farmacologici sempre più specifici per HSP90, in abbinamento alla chemioterapia.

Testando l'efficacia dei complessi HSP-peptide nell'immunoterapia tumorale, mi sono accorto di un fenomeno apparentemente strano, e cioè che l'immunizzazione con dosi molto elevate di HSP non provocava immunità, ma causava la soppressione della risposta immunitaria. Questi studi hanno dimostrato che le HSP potevano agire non solo come immunostimolanti, ma anche come immunosoppressori. Abbiamo dimostrato che nei topi dosi elevate potevano sopprimere il diabete autoimmune di tipo 1 e le encefaliti.

Con i suoi collaboratori, Irun R. Cohen del Weizmann Institute of Science di Rehovot, in Israele, ha perseguito a lungo l'idea che la stessa HSP60 e uno dei suoi peptidi fossero autoantigeni nel diabete umano di tipo 1, e che fossero in grado di innescare un attacco immunitario ai danni delle cellule produttrici di insulina dell'organismo. Nei protocolli clinici hanno dimostrato una certa utilità nel bloccare il peptide, e sono in corso ulteriori trial clinici sull'uomo.

Benché i diversi ruoli delle HSP le rendano interessanti per la cura di varie malattie, la loro universalità presenta anche un pericolo: farmaci che alterano i livelli di HSP rischiano di danneggiare molti sistemi del corpo che dipendono da queste proteine. Ma la storia della farmacologia è piena di esempi di scienziati che hanno imparato a modulare proteine essenziali senza causare effetti collaterali indesiderati, e in futuro le HSP saranno al centro di una serie sempre maggiore di applicazioni.

In una prospettiva più ampia, queste molecole sono state conservate fin dagli albori della vita, perché servivano alle sue infrastrutture di base: per favorire la maturazione delle proteine, concorrendo al loro degrado e tutelando le più fragili dai fattori di stress dell'ambiente, e per proteggere le cellule dagli effetti distruttivi delle mutazioni. Con l'emergere di funzioni biologiche nuove, come l'immunità, il processo evolutivo si è servito di ciò che era già abbondante, usando le HSP nella presentazione dell'antigene. Non credo che abbiamo finito di esplorare tutte le attività di queste magiche molecole. Via via che progredisce la comprensione dei meccanismi biologici, è assai probabile che si scoprano nuovi ruoli di queste diligenti guardiane. ■

Letture

Roles of Heat-Shock Proteins in Innate and Adaptive Immunity. Srivastava P.K., in «Nature Reviews Immunology», Vol. 2, n. 3, pp. 185-194, marzo 2002.

HSP90 and the Chaperoning of Cancer. Whitesell L. e Lindquist S.L., in «Nature Reviews Cancer», Vol. 5, n. 10, pp. 761-772, ottobre 2005.

Heat Shock Factor 1 Is a Powerful Multifaceted Modifier of Carcinogenesis. Dai C. e altri, in «Cell», Vol. 130, n. 6, pp. 1005-1018, 21 settembre 2007.

Phase III Comparison of Vitespen, an Autologous Tumor-Derived Heat Shock Protein gp96 Peptide Complex Vaccine, with Physician's Choice of Treatment for Stage IV Melanoma: The C-100-21 Study Group. Testori A. e altri, in «Journal of Clinical Oncology», Vol. 26, n. 6, pp. 955-962, 20 febbraio 2008.

No-Till: *la rivoluzione silenziosa*

L'antica pratica di rivoltare il terreno prima di seminare una nuova coltura è una delle cause principali della degradazione del suolo agricolo. Per questo motivo, molti coltivatori hanno deciso di rinunciare all'aratro

di David R. Huggins
e John P. Reganold

NEL 1974 John Aeschliman iniziò a sperimentare la tecnica no-till, o di non-lavorazione, per contrastare l'erosione del suolo che colpiva la regione collinare di Palouse, nello Stato di Washington, dove si trova la sua tenuta agricola.

Andy Anderson

John Aeschliman rivolta una manciata di terra nella sua tenuta di 1600 ettari, nella regione di Palouse, nello stato di Washington. La zolla si sbriciola facilmente, rivelando una struttura porosa e un'abbondanza di materiale organico che favorisce la crescita delle radici. Un esercito di lombrichi fa capolino in superficie: altro indice di buona salute.

Fino a 34 anni fa, quando Aeschliman arava i campi prima di ogni nuova semina, interrando i residui della coltura precedente e preparando il terreno per la successiva, nella terra c'erano pochissimi lombrichi. La regione collinare di Palouse era coltivata in quel modo da decenni, ma la pratica dell'aratura iniziava a rivelare i suoi aspetti negativi: il terreno, celebre in passato per la sua fertilità, si erodeva a un ritmo allarmante. Convinto che esistesse un sistema migliore per coltivare la terra, nel 1974 Aeschliman decise di sperimentare un nuovo metodo: la «non-lavorazione», o «lavorazione zero», in inglese *no-till farming*.

Quasi tutti gli agricoltori del mondo ricorrono all'aratura per preparare il letto di semina, non solo per interrare i residui colturali, i concimi animali e le piante infestanti, ma anche per ossigenare e riscaldare la terra. Questi interventi invasivi, tuttavia, rendono il suolo più vulnerabile all'azione erosiva del vento e dell'acqua. La lavorazione del terreno è una delle cause principali del deperimento del suolo agricolo. E questo, a sua volta, è uno dei più gravi problemi ambientali del mondo e costituisce una grave minaccia per la produzione alimentare e il sostentamento delle popolazione rurali, soprattutto nelle sacche di povertà densamente popolate dei paesi in via di sviluppo.

Alla fine degli anni settanta, nella regione di Palouse, il 10 per cento dei campi coltivati aveva perso il 100 per cento del soprassuolo per colpa dell'erosione, e in un altro 60 per cento del terreno agricolo la percentuale di erosione variava dal 25 al 75 per cento. L'aratura favorisce il deposito di sedimenti nei fiumi, nei laghi e negli oceani, che vengono così contaminati da fertilizzanti e pesticidi. L'agricoltura no-till, invece, cerca di limitare il degrado del suolo: i residui colturali non sono rimossi dopo il raccolto, in modo da formare uno strato di pacciame che protegge il terreno dall'erosione e ne migliora la produttività. Per la semina, gli agricoltori usano speciali macchinari che si insinuano tra i residui penetrando nel suolo sottostante.

Per nutrire una popolazione mondiale in costante aumento, il settore agricolo continua a espandersi, esercitando un impatto sempre maggiore sull'ambiente, la salute dell'uomo e la biodiversità. Ma alla luce di ciò che sappiamo ora sui

IN SINTESI

- L'agricoltura convenzionale, basata sull'aratura, espone il suolo a un rischio maggiore di erosione e dilavamento.
- In diverse parti del mondo gli agricoltori seguono i principi della «non-lavorazione» (*no-till*), un sistema di coltivazione sostenibile che mira a non alterare gli equilibri del suolo.
- La diffusione delle pratiche no-till incontra però vari ostacoli, tra cui il costo elevato dei macchinari e la difficoltà di impararne correttamente i principi.

Le tappe dell'agricoltura

Benché l'agricoltura no-till abbia origini remote quanto il metodo convenzionale, questo si è diffuso maggiormente, grazie soprattutto all'evoluzione dell'aratro. Negli ultimi decenni, tuttavia, i progressi nel settore dei diserbanti e dei macchinari hanno reso convenienti anche i metodi no-till.

8000 a.C.

Bastone da scavo: il metodo più antico di non-lavorazione permette di piantare i semi in profondità senza coltivare la terra.

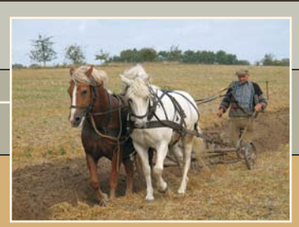
Aratro a uncino: il primo modello di aratro ripulisce lo strato superficiale del terreno creando una scanalatura in cui vengono disposti i semi.

6000 a.C.

Animali da soma: sostituiscono l'uomo nel traino dell'aratro.

3500 a.C.

Vomere: attrezzo a cuneo rinforzato con una lama di ferro che lacera lo strato superficiale del terreno.



1100 a.C.

Aratro a versoio: è dotato di una lama curva (il versoio) che rivolta le zolle interrando erbe infestanti e residui colturali.

Metà XIX secolo

Versoio d'acciaio: ideato da John Deere nel 1837 per rompere la zolla erbosa delle praterie.

Inizio XX secolo

Trattori: trainano aratri multipli.

Anni quaranta

Diserbanti: sostanze come atrazina e paraquat che permettono di eliminare le piante infestanti senza lavorare la terra.

Anni sessanta

Seminatrici no-till: creano un leggero solco soltanto in corrispondenza delle file di semina, intervenendo solo in minima parte sul terreno.

Stewart Higgins, Washington State University (*Huggins e Reganold*); Wu Hong/Epa/Corbis (*aratro a uncino*); Ralf Roletschek (*aratro a versoio*); Hugh Talman/Smithsonian Images (*versoio John Deere*); Lane Lambert/StockPhoto (*trattore*); Andy Anderson (*seminatrice no-till*)

GLI AUTORI

DAVID R. HUGGINS (*a sinistra*) conduce ricerche sul suolo per conto della USDA Agricultural Research Service, Land Management and Water Conservation Research Unit a Pullman, Washington. JOHN P. REGANOLD, Regents Professor of Soil Science alla Washington State University di Pullman, è esperto di agricoltura sostenibile.

limiti del pianeta, stiamo cominciando a capire che produrre cibo a sufficienza non basta: bisogna anche farlo con metodi sostenibili. Gli agricoltori devono ottenere raccolti di qualità, conservare le risorse naturali per le future generazioni, guadagnare abbastanza per la loro sussistenza e agire in modo socialmente responsabile verso i loro dipendenti e la comunità. La coltivazione no-till ha il potenziale per concretizzare questa idea di agricoltura sostenibile. Come ogni nuova pratica, presenta sfide e contropartite. Tuttavia in alcune parti del mondo cresce il numero degli agricoltori che abbandonano l'aratro.

Radici profonde

Fin dagli albori dell'agricoltura, circa 10.000 anni fa, l'uomo ha ricavato nutrimento dalla terra lavorandola con o senza l'aratro. Nell'epoca di transizione dalla caccia e raccolta alla coltivazione, i nostri antenati del Neolitico integravano i frutti spontanei con i prodotti degli orti piantati vicino alle abitazioni. Alcuni praticavano una sorta di primordiale no-till: foravano il terreno con un bastone e vi facevano cadere i semi, che poi coprivano di terra. Altri invece scavavano solchi nel terreno, anticipando la moderna aratura, e poi vi interravano i semi. Ancora oggi, molti agricoltori dei paesi in via di sviluppo usano questi metodi.

Nel tempo, le procedure di semina e di controllo delle piante infestanti si sono progressivamente meccanizzate, grazie all'invenzione dell'aratro, che ha consentito di nutrire molti con il lavoro di pochi. I primi modelli di aratro incidevano solo lo strato superficiale del suolo ed erano formati da una struttura portante a cui era fissata un'asta di legno che veniva trascinata sul terreno. Probabilmente il loro impiego richiedeva due persone: una per tirarlo e una per guidarlo. Poi l'uomo fu sostituito dagli animali da soma addomesticati, come i buoi in Mesopotamia, forse già intorno al 6000 a.C. La seconda grande rivoluzione risale al 3500 a.C., quando Egizi e Sumeri inventarono il vomere: un cuneo di legno dotato di una lama di ferro in grado di incidere la parte superficiale del suolo. Nell'XI secolo gli europei usavano un perfezionamento di questa invenzione aggiungendo una lama curva, il versoio, che fissata dietro al vomere rivoltava le zolle di terra.

A metà dell'Ottocento i continui progressi nella tecnologia dell'aratro permisero agli agricoltori di coltivare le praterie erbose dell'Europa occidentale, del Sudafrica, del Canada, dell'Australia, della Nuova Zelanda e degli Stati Uniti, convertendole in campi di mais, grano e altre colture. Una di queste regioni, le Grandi Pianure del Midwest, negli Stati Uniti, aveva resistito a lungo alla diffusione dell'agricoltura, a causa dello spesso strato di zolla erbosa che le ricopriva. Nel 1837 però un fabbro dell'Illinois, John Deere, inventò un versoio d'acciaio capace di fendere le zolle d'erba. Oggi quelle praterie, che comprendono gran parte della celebre Corn Belt, la «cintura del grano», sono una delle aree di maggiore produzione agricola del mondo.

La meccanizzazione dell'agricoltura proseguì agli inizi del Novecento con l'introduzione di diversi strumenti che consentivano di coltivare i campi in modo sempre più intensivo, tra cui i trattori che trainavano aratri multipli. Ma queste pratiche agricole stavano per finire sul banco degli imputati; tra il 1931 e il 1939 nelle pianure meridionali degli Stati Uniti si verificò un fenomeno, il *Dust Bowl* («catino di polvere»), che rivelò la grande vulnerabilità dei terreni arati.

In quegli anni, la siccità si alternò a un forte vento che rimosse gran parte dello strato superficiale del suolo, con conseguenze disastrose per le coltivazioni e le fattorie. Nacque così il movimento per la conservazione del suolo, e gli agricoltori iniziarono a sperimentare nuovi metodi di lavorazione ridotta che lasciavano sul terreno i residui colturali come copertura protettiva. Un ulteriore stimolo al movimento fu, nel 1943, il controverso volume *Plowman's Folly*, dell'agronomo Edward Faulkner, che metteva in discussione la necessità dell'aratro. Le sue radicali teorie divennero più applicabili dopo la seconda guerra mondiale, con lo sviluppo dei diserbanti (come 2,4-D, atrazina e paraquat), e negli anni sessanta, con le prime approfondite ricerche sulle pratiche di non-lavorazione.

Considerando il ruolo cruciale dell'aratro nella storia dell'agricoltura, farne a meno si è dimostrato estremamente difficile, perché richiede di reinventare praticamente ogni aspetto della produzione agricola. Ma a partire dagli anni sessanta sono state sviluppate nuove seminatrici destinate a soddisfare le particolari esigenze di meccanizzazione della coltivazione no-till. Questi macchinari innovativi, insieme ai diserbanti chimici, sono due delle principali tecnologie che hanno finalmente permesso alle aziende agricole di applicare le pratiche di non-lavorazione su scala commerciale.

Dean Conger/National Geographic/Getty Images

UN TERRENO DIFFICILE

Anche se in teoria la non-lavorazione potrebbe essere praticata su quasi tutto il suolo agricolo mondiale, il costo dei macchinari e dei diserbanti necessari è proibitivo per molti coltivatori, gran parte dei quali hanno piccole aziende. A parte i costi, è la povertà stessa a spingere questi agricoltori a usare, per esempio, i residui colturali e gli escrementi animali come carburante e ad arare la terra per ottenere profitti in breve tempo invece di investire in progetti a lungo termine.
Dei 525 milioni di aziende agricole esistenti nel mondo, circa l'85 per cento ha meno di due ettari di terra. La stragrande maggioranza di queste piccole fattorie – l'87 per cento – si trova in Asia; l'Africa ne ospita l'8 per cento. La diffusione delle pratiche no-till in queste regioni, che ne trarrebbero i maggiori vantaggi, è praticamente nulla.

I semi del futuro

I metodi convenzionali di preparazione del letto di semina alterano il terreno in diversa misura. L'aratura con versoio rivolta completamente i primi 15-25 centimetri di suolo, interrando gran parte dei residui colturali, mentre lo scarificatore frantuma solo lo strato superficiale, conservando molti più residui. L'agricoltura a lavorazione zero, invece, prevede la creazione di un solco poco profondo, tra 1 e 7 centimetri, soltanto in corrispondenza delle file di semina, smuovendo pochissimo il terreno.

Secondo il Department of Agriculture degli Stati Uniti, queste pratiche agronomiche rientrano nella più ampia definizione di «agricoltura conservativa», che include tutti i metodi grazie a cui si conservano abbastanza residui colturali da coprire almeno il 30 per cento del terreno dopo la semina. L'azione protettiva dei residui è notevole: secondo i dati dell'USDA National Resource Inventory, tra il 1982 e il 2003 negli Stati Uniti l'erosione del suolo agricolo da parte dell'acqua e del vento è diminuita del 43 per cento, e gran parte di questo calo deriva dall'adozione di pratiche agricole conservative.

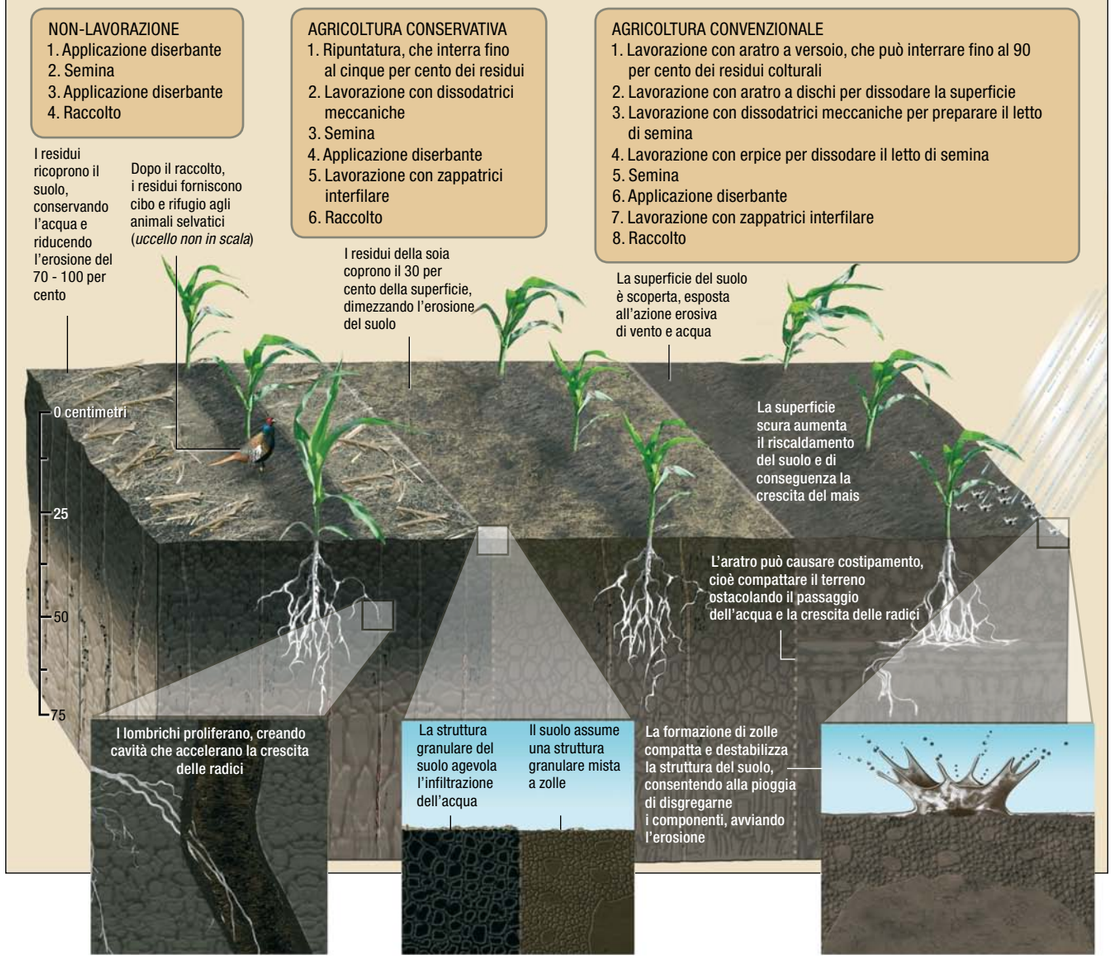
Ma la protezione del suolo non è l'unico vantaggio dei metodi no-till. La presenza di residui colturali in superficie ostacola il dilavamento e riduce l'inquinamento delle risorse idriche da parte di sedimenti, fertilizzanti e pesticidi. I residui contribuiscono alla tutela idrica anche riducendo l'evaporazione. Nelle aree in cui la disponibilità di acqua limita la produzione agricola, una maggiore conservazione idrica può aumentare la resa dei raccolti o consentire colture alternative.

La non-lavorazione, inoltre, sostiene la biodiversità della flora e della fauna del suolo, offrendo i residui colturali come nutrimento agli organismi presenti nel terreno e stabilizzando il loro habitat. Assieme all'aumento di materia organica nel suolo, questo incoraggia lo sviluppo di una struttura interna del terreno più stabile, produttiva e resistente agli interventi agricoli e ai rischi ambientali. Le pratiche no-till consentono quindi di coltivare in modo sostenibile anche i terreni con una pendenza media o elevata, più esposti al rischio di erosione.

I benefici dell'agricoltura no-till si estendono alla fauna selvatica, perché i residui colturali e le

Metodi a confronto

L'illustrazione mette a confronto tre metodi di coltivazione a rotazione soia-mais nella Corn Belt degli Stati Uniti.



Daniela Naomi Molnar

inevitabili perdite di grano durante il raccolto garantiscono protezione e cibo agli uccelli e ad altre specie. Uno studio pubblicato nel 1986 ha rivelato che nei campi no-till dell'Iowa nidificavano 12 specie aviarie, e in quelli arati solo tre.

Per di più, l'uso ridotto dell'aratro aumenta l'assorbimento di carbonio nel suolo. Questa è una delle strategie più efficaci offerte dall'agricoltura per mitigare l'effetto serra: le colture prelevano l'anidride carbonica dall'atmosfera con la fotosintesi, mentre i loro residui e l'apparato radicale si trasformano in materia organica, che è al 58 per cento carbonio. Negli Stati Uniti, metà del potenziale complessivo di sequestro del carbonio dei terreni agricoli è riconducibile all'agricoltura conservativa, comprese le pratiche no-till.

La non-lavorazione comporta anche vantaggi economici per gli agricoltori. Il numero di passaggi sul terreno necessari per avviare le colture e completare il raccolto scende in genere da un minimo di nove a un massimo di quattro, con una conseguente riduzione del consumo di carburante, tra il 50 e l'80 per cento, e della manodopera, tra il 30 e il 50 per cento. I costi di produzione per ettaro si abbassano quindi drasticamente. Inoltre, benché i macchinari per la semina no-till siano piuttosto costosi (le seminatrici più sofisticate superano i 100.000 dollari), i costi totali di impianto ed esercizio calano anche del 50 per cento, perché l'impiego e la manutenzione delle macchine agricole tradizionali non sono più necessari.

Kevin Hand

Il risparmio di tempo e denaro consente alle piccole aziende agricole di mantenersi a livelli concorrenziali, oppure di ingrandirsi e coltivare superfici più estese, raddoppiando le proprie dimensioni senza aumentare né il numero di macchine né la manodopera. Infine migliora anche la qualità della vita dei coltivatori, che possono dedicare ad aspetti più interessanti della loro attività il tempo precedentemente impiegato per banali pratiche agronomiche.

Coltivare sogni

L'agricoltura no-till e le altre pratiche conservative funzionano in climi, terreni e aree geografiche molto diversi. La non-lavorazione continua, inoltre, è adatta alla maggior parte delle colture, a eccezione del riso in risaia allagata e delle radici commestibili (come le patate). Tuttavia nel 2004, l'anno a cui si riferiscono i dati più recenti, meno di cento milioni di ettari in tutto il mondo erano coltivati con il metodo no-till, meno del 7 per cento del totale dei terreni agricoli.

I cinque paesi con la maggiore superficie agricola coltivata con questo sistema sono, nell'ordine, Stati Uniti, Brasile, Argentina, Canada e Australia. Nel 2004 negli Stati Uniti il 41 per cento di tutte le colture era coltivato secondo le regole dell'agricoltura conservativa, rispetto al 26 per cento del 1990: una crescita dovuta principalmente all'adozione delle pratiche no-till, più che triplicate in quel periodo, tanto da coinvolgere il 22 per cento del terreno agricolo statunitense, e che riflette senz'altro la possibilità di usufruire di sussidi governativi e di altri finanziamenti. Nel Sud America la non-lavorazione si è affermata abbastanza rapidamente grazie all'impegno coordinato di consulenti universitari e comunità locali nello sviluppo di sistemi agricoli no-till «su misura».

In Europa, in Africa e nella maggior parte dell'Asia, d'altro canto, l'adozione delle pratiche di non-lavorazione è molto più ridotta, e si sta rivelando particolarmente difficile nei paesi in via di sviluppo dell'Africa e dell'Asia, dove spesso gli agricoltori usano i residui colturali come carburante, mangime per gli animali o altro. In queste aree geografiche, inoltre, le macchine seminatrici specializzate e i diserbanti necessari per controllare le piante infestanti non sono sempre disponibili, oppure hanno costi proibitivi. In Europa, invece, l'assenza di politiche governative di promozione dell'agricoltura no-till e le pesanti restrizioni sull'uso dei pesticidi (erbicidi inclusi) non incentivano gli agricoltori ad adottare quelle pratiche.

NO-TILL: PRO E CONTRO

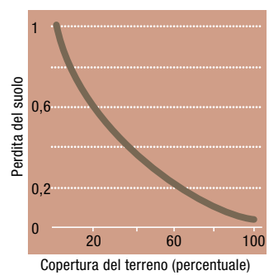
VANTAGGI

- Riduzione dell'erosione
- Conservazione dell'acqua
- Miglioramento delle proprietà del suolo
- Diminuzione delle spese per carburante e manodopera
- Riduzione dei sedimenti nei laghi e nei fiumi e della loro contaminazione da parte dei fertilizzanti
- Sequestro del carbonio

SVANTAGGI

- Complessità della transizione dal metodo convenzionale alla non-lavorazione
- Costo elevato dei macchinari
- Maggiore dipendenza dagli erbicidi
- La presenza di erbe infestanti, parassiti e patologie può mutare in modi inattesi
- Impiego iniziale più massiccio di fertilizzanti azotati
- Possibile rallentamento della germinazione e diminuzione del raccolto

LA DIFESA DEL SUOLO



Coprire il 30 per cento del suolo con i residui colturali permette di ridurre l'erosione del 50 per cento rispetto ai terreni scoperti e a riposo. Gli effetti benefici aumentano vertiginosamente se la superficie rimane coperta per il 50-100 per cento dell'anno, come accade nella coltivazione no-till.

Il passaggio dall'agricoltura convenzionale alla non-lavorazione è complesso, anche perché spesso si scontra con l'opinione diffusa che le pratiche no-till aumentino il rischio di perdita del raccolto o ne diminuiscano la resa. Benché sappiano che la loro attività non è immune da insuccessi, gli agricoltori sono comunque restii ad adottare nuove pratiche agronomiche con un rischio di fallimento più elevato rispetto ai metodi tradizionali. Poiché la non-lavorazione implica un mutamento radicale, i coltivatori che decidono di adottarla devono imparare partendo da zero. Il passaggio ai principi no-till, inoltre, ha un profondo impatto sul terreno agricolo e i campi: può favorire l'insorgenza di nuove specie di infestanti e parassiti o nuove patologie delle piante. Gli alti livelli di umidità, per esempio, possono agevolare la diffusione di nuove patologie fungine, prima prevenute dall'aratura.

Inoltre possono passare anni, o decenni, prima che alcuni cambiamenti conseguenti alla non-lavorazione diventino definitivi, e gli agricoltori devono essere sempre vigili e pronti ad adattarsi a situazioni inaspettate, collegate alle condizioni del suolo e dei residui colturali oppure alla gestione dei fertilizzanti. Durante la transizione, c'è un rischio reale di diminuzione o perfino di perdita del raccolto. Nella regione di Palouse, per esempio, alcune aziende agricole che tentarono il no-till negli anni ottanta hanno chiuso. I coltivatori interessati a queste pratiche dovrebbero convertire, all'inizio, solo il 10-15 per cento dei terreni.

Spesso i neofiti vanno in visita nelle aziende convertite e si riuniscono in gruppi a livello locale per condividere le esperienze e analizzare questioni specifiche. Nelle zone in cui la non-lavorazione non si è ancora affermata, tuttavia, le informazioni possono essere incomplete o contraddittorie, e questa mancanza di conoscenze, esperienze o attrezzature può rivelarsi disastrosa. Per esempio, se in una comunità rurale si ritiene che le pratiche no-till comportino rischi maggiori di quelle convenzionali, può capitare che le banche neghino un prestito ai coltivatori che vorrebbero convertire la produzione. A volte succede addirittura che i proprietari dei terreni rifiutino di affidare i loro possedimenti ad agricoltori che coltivano con il metodo della non-lavorazione, per paura di subire perdite economiche. La diffusione di informazioni accurate tra agricoltori, università e istituzioni sarebbe perciò un enorme passo avanti per superare gli attuali impedimenti.

Ma il sistema ha i suoi svantaggi anche quando la coltivazione è in mani esperte. La produzione di raccolti no-till su terreni a tessitura fine e con scarso drenaggio può rivelarsi particolarmente

Chi semina vento...

Poiché il suolo impiega molto tempo a rigenerarsi, la sua conservazione è fondamentale

Una delle conseguenze negative dell'agricoltura convenzionale è l'erosione del soprassuolo, soprattutto nei terreni in pendenza. Lo strato superficiale dei campi lavorati rimane scoperto e quindi soggetto a dilavamento, mentre ogni passaggio dell'aratro spinge la terra sempre più a valle, assottigliando lo strato coltivabile. I tempi di questo processo non dipendono solo dalla velocità con cui l'aratro spinge a valle la terra – o con cui il vento o l'acqua ne asportano la superficie – ma anche dal ritmo con cui la roccia madre sottostante si disgrega per formarne di nuova. Negli anni cinquanta, quando il Soil Conservation Service (oggi Natural Resources Conservation Service) iniziò a determinare i livelli di erosione dei terreni agricoli, i dati relativi alla pedogenesi, ovvero alla formazione del suolo, erano pressoché inesistenti.

L'agenzia stabilì allora i valori di tolleranza di perdita del suolo, o «valori T», in base a ciò che gli agricoltori avrebbero potuto fare per ridurre l'erosione, «senza subire danni economici indebiti» usando macchinari agricoli convenzionali. I valori T corrispondono a un pollice (2,54 centimetri) di erosione in 25 anni. Studi più recenti hanno però dimostrato che il ritmo dell'erosione del suolo è molto più elevato di quello di rigenerazione.

Negli ultimi decenni, gli scienziati hanno determinato che misurando la concentrazione nel suolo di alcuni isotopi di cui sono noti i tempi di formazione è possibile quantificare direttamente la velocità di formazione del terreno. Applicando questa tecnica ai suoli delle regioni temperate della costa californiana e del sud-est dell'Australia, il geologo Arjun Heimsath della Arizona State University ha rilevato che la formazione di nuovo terreno varia tra 0,002999 e 0,007998 centimetri all'anno. In altre parole, in questi luoghi per formare due centimetri e mezzo di terreno devono trascorrere da 300 a 850 anni. Una mia recente compilazione di dati raccolti in tutto il mondo, pubblicata l'anno scorso sui «Proceedings of the National Academy of Sciences» ha evidenziato una velocità di formazione media compresa tra 0,001752 e 0,003599 centimetri all'anno: da 700 a 1500 anni per produrre 2,5 cm di suolo.

Il suolo collinare incontaminato in aree climatiche temperate e tropicali misura in genere da 30 a 90 centimetri. Se si considerano i ritmi da secolari a millenari di formazione del suolo e quelli secolari di erosione in condizioni di agricoltura basata sull'uso dell'aratro, si deduce che per consumare interamente il suolo di queste regioni bastano da qualche centinaia di anni a un paio di millenni. Questa semplice stima predice in modo eccellente la durata di vita media delle principali civiltà rurali del passato. A eccezione delle fertili vallate fluviali dove nacque l'agricoltura, queste civiltà in genere sono durate da 800 a 2000 anni, e gli studi geoarcheologici hanno ormai dimostrato un legame tra l'erosione del suolo e il declino di molte antiche culture.

È evidente, perciò, che se vogliamo conservare le risorse per le generazioni future abbiamo bisogno di alternative all'agricoltura convenzionale. Le pratiche di non-lavorazione riducono l'azione dell'acqua e aumentano al contempo la capacità del terreno di trattenere il soprassuolo, rendendo questi metodi particolarmente efficaci nel limitare l'erosione.

L'EROSIONE DEL VENTO nelle Great Plains meridionali degli Stati Uniti all'epoca del Dust Bowl rivelò i pericoli dell'agricoltura basata sull'aratro.

Getty Images

In uno studio del 1993, alcuni ricercatori dell'Università del Kentucky rilevarono che la coltivazione no-till riduceva l'erosione addirittura del 98 per cento. Più di recente, uno studio dell'Università del Tennessee ha riferito che la coltivazione no-till del tabacco riduce l'erosione del 90 per cento rispetto ai metodi agricoli convenzionali. Benché gli effetti della non-lavorazione sui ritmi di erosione dipendano da una serie di fattori contingenti, come il tipo di terreno e di coltura, questo tipo di agricoltura può portare la velocità di erosione molto vicino a quella di formazione del terreno.

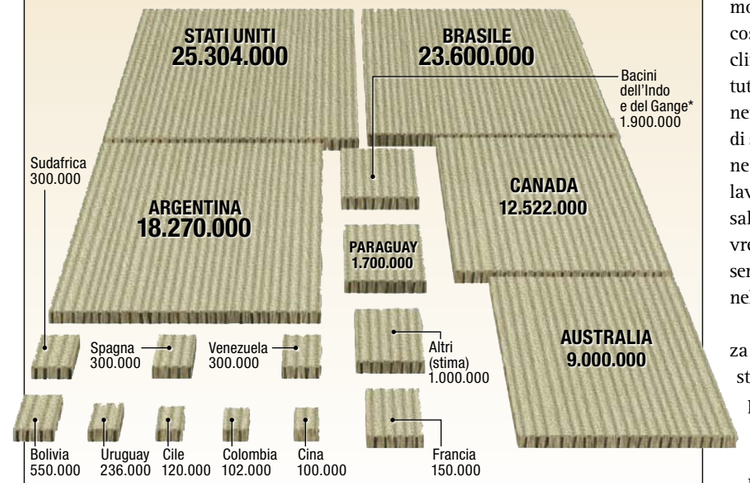
A metà degli anni novanta uno studio della Cornell University stimò in 44 miliardi di dollari all'anno la somma necessaria per rimediare ai danni dell'erosione negli Stati Uniti, mentre un intervento per portare i ritmi dell'erosione del suolo agricolo alla pari con quelli della rigenerazione richiederebbe una spesa annuale di circa 6 miliardi di dollari. I ricercatori hanno inoltre calcolato che per ogni dollaro investito nella conservazione del suolo la società ne risparmierebbe cinque. Poiché il costo per riportare la terra sui campi da cui è stata asportata è proibitivo, la soluzione migliore, più efficace sui costi, è quella di lasciarla semplicemente al suo posto, nei campi.

David R. Montgomery

David R. Montgomery è professore di geomorfologia all'Università di Washington e autore di *Dirt: The Erosion of Civilizations*.

Superficie no-till

Meno del 7 per cento del suolo agricolo mondiale è coltivato secondo le pratiche no-till. Di questi 95 milioni di ettari, circa l'85 per cento è in Nord e Sud America.



** Comprendono la maggior parte dell'India settentrionale e orientale, le regioni più popolose del Pakistan, e quasi tutto il Bangladesh.*
FONTE: United Nations Food and Agriculture Organization, dati 2004. (Le cifre sono arrotondate)

Kevin Hand

problematica, tanto da ridurne la produttività. In un campo di mais con queste caratteristiche, per esempio, la non-lavorazione può comportare una diminuzione del raccolto del 5-10 per cento rispetto alle pratiche convenzionali. Poiché inoltre la maggiore presenza di residui colturali rispetto ai campi tradizionali impedisce al sole di filtrare e riscaldare la terra, in primavera la temperatura del suolo è generalmente inferiore, e alle alte latitudini può rallentare la germinazione dei semi e la crescita delle colture estive, come il mais.

Nei primi 4-6 anni, le pratiche no-till richiedono maggiori quantità di fertilizzanti azotati – fino al 20 per cento in più rispetto all'agricoltura convenzionale – per poter garantire alle piante le sostanze nutritive necessarie: la materia organica presente sullo strato superficiale, infatti, impedisce il passaggio dei nutrienti, compreso l'azoto.

Se il terreno non viene arato, inoltre, è necessario usare più diserbanti, ma poiché nei campi non lavorati si stanno ormai diffondendo piante resistenti, l'agricoltura no-till deve affidarsi allo sviluppo di sostanze sempre nuove e di altri sistemi efficaci di controllo. L'immissione massiccia di sostanze chimiche, d'altra parte, non comporta soltanto un maggiore impegno economico, ma può anche contaminare l'aria, l'acqua e il suolo e avere un impatto negativo su specie vegetali non interessate.

Soluzioni integrate

L'agricoltura no-till offre potenziali vantaggi sempre più auspicabili in un mondo che deve fare i conti, tra tanti gravi problemi, con la crescita demografica, il degrado ambientale, l'aumento dei costi di produzione dell'energia e i cambiamenti climatici. Tuttavia, il metodo non è la panacea di tutti i mali: in agricoltura non esiste nulla del genere. Piuttosto, è parte di una visione più ampia di sostenibilità, in cui l'applicazione e l'integrazione di pratiche agronomiche differenti, dalla non-lavorazione alla coltivazione biologica, è ritenuta salutare. A nostro parere, tutti gli agricoltori dovrebbero integrare i metodi dell'agricoltura conservativa e, dove possibile, della non-lavorazione, nelle loro aziende.

In futuro, per contenere il rischio della resistenza ai pesticidi, sarà necessario adottare diverse strategie di controllo degli infestanti, che comprendano soluzioni biologiche, fisiche e chimiche. I metodi di successo dell'agricoltura biologica potranno servire come riferimento. La rotazione delle colture, per esempio, che prevede la successione stagionale di coltivazioni diverse sullo stesso terreno, si sta già rivelando utile nella lotta ai parassiti, perché interrompe i cicli di sviluppo degli infestanti e delle patologie tipici delle monocolture.

In questo senso, la capacità di produrre una selezione di raccolti differenti potrebbe convincere un numero maggiore di agricoltori alla conversione. Nel Midwest statunitense, la grande enfasi sulla coltivazione del mais per ricavarne etanolo spinge gli agricoltori della Corn Belt a seminare anno dopo anno lo stesso vegetale. In questa regione, quindi, la diffusione delle pratiche no-till sarà sempre più difficile. Le colture da cui si ricavano biocarburanti possono crescere su campi non lavorati, ma per essere sostenibili dovrebbero essere inserite in un ciclo di rotazione. La semina su terreni marginali di colture alternative, utili da un punto di vista bioenergetico, per esempio il panico verga, oppure delle piante commestibili perenni attualmente allo studio, potrebbe servire come incentivo per l'adozione delle pratiche no-till.

Oggi, a trent'anni dai primi tentativi di applicazione di questo metodo nella sua tenuta di Palouse, John Aeschliman usa pratiche di non-lavorazione sul 100 per cento dei suoi terreni. La conversione è stata prudente e graduale, per scongiurare una riduzione del raccolto e dei profitti. Ma ora Aeschliman, insieme a molti altri agricoltori di piccole e grandi aziende, raccoglie i frutti del suo impegno e si adopera per favorire l'evoluzione dell'agricoltura verso la sostenibilità. ■

➥ Letture

Corn-Soybean Sequence and Tillage Effects on Soil Carbon Dynamics and Storage. Huggins D.R., Allmaras R.R., Clapp C.E., Lamb J.A. e Randall G.W., in «Soil Science Society of America Journal», Vol. 71, n. 1, pp. 145-154, 1° gennaio 2007.

Constraints to Adopting No-Till Farming in Developing Countries. Rattan L., in «Soil & Tillage Research», Vol. 94, n. 1, pp. 1-3, maggio 2007.

Dirt: The Erosion of Civilizations. Montgomery D.R., University of California Press, 2007.

No-Tillage Seeding in Conservation Agriculture. Baker J.C. e altri, CABI Publishing, 2007 (II edizione).

Per ulteriori informazioni è possibile visitare il sito (in inglese) della Food and Agriculture Organization delle Nazioni Unite: **www.fao.org/ag/ca.**

Il sito della European Conservation Agriculture Federation (in italiano) **www.ecaf.org/italia/italiano.htm.**

Aspiranti Baristi Orbitali

I nostri matematici invecchiano: si sono dimenticati di firmare con i loro nomi d'arte, e inventano problemi sull'astronave di Stanley Kubrick...

di Rodolfo Clerico, Piero Fabbri e Francesca Ortenzio

"Capo, stai diventando vecchio?». «Sono già vecchio. Ma divento rapidamente nervoso, se me lo fanno notare. Che razza di domande fai, Alice?». «Beh, te ne stai lì, tutto curvo su quella chiavetta USB, con righelli, vernici e pennelli... Pensavo ti stessi dando al bricolage. E il bricolage è un chiaro sintomo di vecchiaia».

«Un chiaro sintomo di vecchiaia lo avremo quando saremo talmente rimbambiti da dimenticare di firmare i nostri pezzi per "Le Scienze" con gli allonimi. Quello sì, che sarebbe un chiaro segno di demenza senile, altro che il bricolage...».

Piotr entra proprio in quel momento. Le sue orecchie, solitamente mezze sorde, fanno in tempo a captare l'ultima parola. «Bricolage? Chi ha detto bricolage? È la mia passione!».

«Ecco, appunto. Che ventata di freschezza...»

«Capo, che fai con quella chiavetta USB?»

Rudy riabbassa gli occhiali sul naso, allontana regoli, pennelli e colori e fa oscillare significativamente la sottile chiavetta sotto gli occhi degli altri due. «Insomma, non notate niente? Date un occhio alle proporzioni, per la miseria!». «Misurandole con un righello? Guarda che sono i litri a essere parenti dei centimetri cubi, non i byte. È un altro tipo di capacità, quella».

«La capacità del tuo cervello rimane irrisoria, sia in cc sia in MB. Doc, ho detto *proporzioni*, non *dimensioni*. Finalmente ho trovato una chiavetta con gli spigoli in rapporto 1:4:9, e intendo appendermela al collo. Dopo essere riuscito a colorarla di nero, naturalmente».

Alice continua a mostrare una perplessa espressione di compatimento, ma a Piotr l'indizio sembra bastare: «Parallelepipedo nero, spigoli in proporzione 1:4:9, ci sono! È il monolite di *2001: Odissea nello Spazio*!». «E cos'altro, sennò? Gran film, eh?».

I due hanno la stessa espressione dei dodicenni di fronte a una nuova console di videogiochi. Alice, invece, ha un'espressione tra il rassegnato e lo schifato: «Stavamo giusto accennando ai segnali delle non più verdi età, giovanotti. Ormai il 2001 è passato da anni, e nelle sue cronache ci sono state più guerre sante di stampo medievale che astronauti e basi lunari, ve ne ricordate?». Macché, non la sentono proprio. Sono in piena rievocazione celebrativa, beati come due ragazzini, neanche fosse il quarantennale di «Le Scienze» e avessero i loro nomi in calce a un articolo.

«Un capolavoro! Anzi, dire capolavoro forse è ancora poco. Però hai notato quante previsioni mancate? Quella che mi ha sempre stupito è l'idea della base spaziale a forma di toro. Qualche autore deve aver fatto notare che con un po' di rotazione si poteva ottenere un certo grado di gravità apparente, e forse da lì l'idea che le basi spaziali potessero essere degli anelloni rotanti è diventata un paradigma. Ma la Mir e la Stazione spaziale internazionale sono tutto fuorché toroidali. Certo, una base orbitante a forma di anello è assai più intrigante. Pensa per esempio ai bar».

Questa volta anche Piotr ha l'aria perplessa: i bar sono ameni per definizione, ma al momento sembrano stagliarsi nel discorso con la stessa opportunità dei celebri cavoli a merenda. «Che c'entrano i bar, adesso? – chiede Alice – Mi sembra che nel film ce ne fosse solo uno».

«Appunto. Del tutto insufficiente, per una stazione spaziale popolata come quella. Ce ne vogliono almeno quattro. E questo mi fa venire in mente una cosa...».

Piotr impallidisce. Il suo magico senso d'allarme, quello che spesso lo preavverte dell'arrivo di un problema di Rudy, stavolta ha fatto miseramente cilecca. Alice è già catturata, occhi e occhiali attenti, e lui non può scappare. Sempre facendo oscillare la chiavetta USB come fosse il pendolino di un ipnotizzatore, Rudy continua a iniettare gli elementi di quello che, indubbiamente, è proprio un ennesimo problema.

«Immaginate che siano state concesse le licenze per quattro bar che dovranno essere aperti su quella stazione toroidale, uno a un mese di distanza dall'altro. Considerate la stazione uniformemente popolata e soprattutto immaginate che il lussureggiante locale *Alice & Piotr Starry Lounge* sia il secondo a dover aprire. Conoscete la posizione del primo bar già aperto; sapete che altri due bar apriranno a breve; siete consci che ogni gestore, voi compresi, sceglie la propria posizione in modo da massimizzare il numero di clienti e sapete anche che questi, pigri, si limitano ad andare sempre al bar più vicino a casa. E naturalmente anche il terzo e il quarto gestore se la cavano bene quanto voi, in logica. Allora, dove aprite il vostro bar, rispetto al primo?»

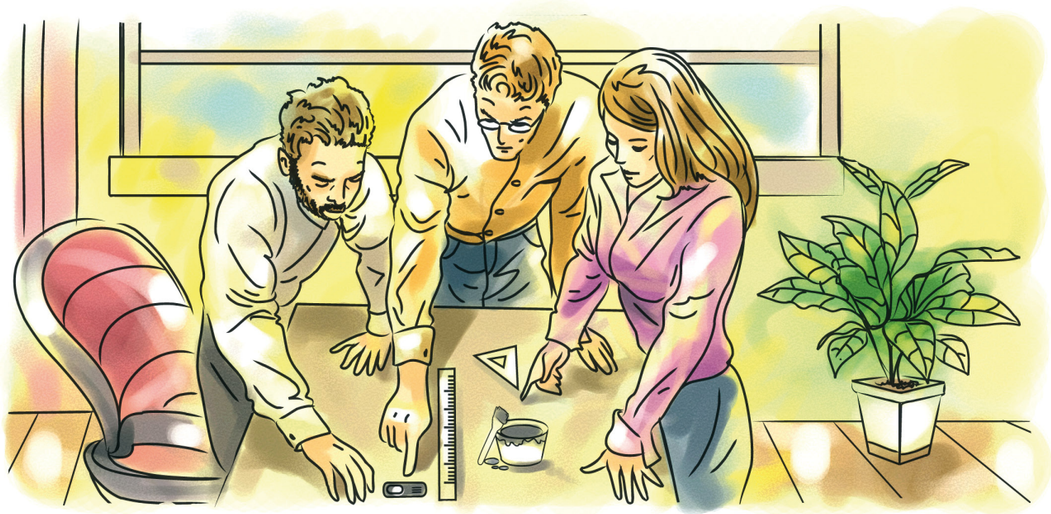
Doc tenta miseramente di minimizzare: «Ovvio, il nostro bar si aprirà in posizione diametralmente opposta al primo...», lancia un sorriso complice ad Alice, che però non pare per niente convinta. «La posizione del primo bar è l'unico dato che conosciamo, e logica vuole che, per dividere equamente in due la potenziale clientela, noi si debba dividere anche...».

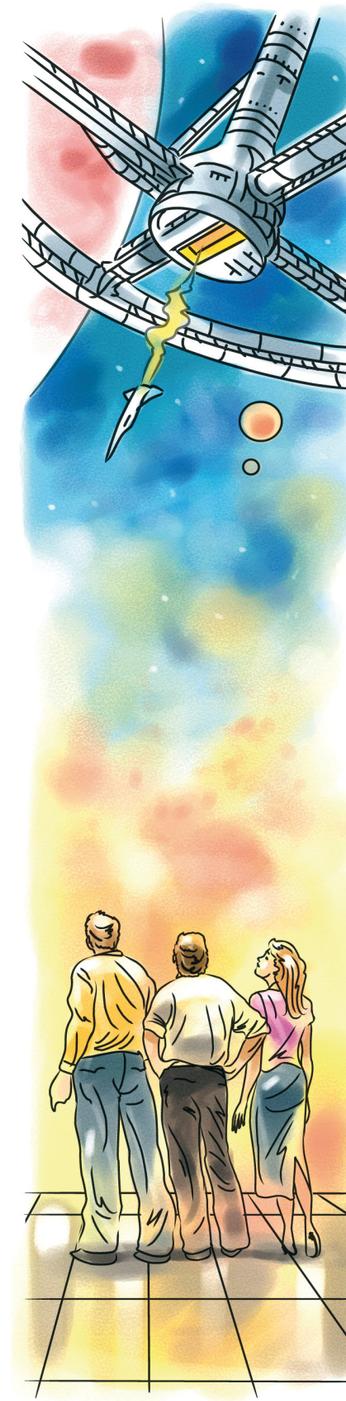
«Quello che la logica vorrebbe è che tu evitassi di massacrarla», lo interrompe Rudy. «Se i bar fossero solamente due, il secondo potrebbe aprire in qualsiasi posizione: la perfetta divisione della clientela sarebbe comunque garantita dalla simmetria. Per contro, non tener conto di quel che faranno gli altri gestori è un puro suicidio commerciale. Te l'ho detto mille volte, "ovvio" è parola pericolosissima in matematica».

«È vero! Ma io so chi lo ha detto per primo, e scommetto che invece tu non te lo ricordi! E io non discuto con chi cita le massime senza ricordarne l'autore!».

Piotr si alza e se ne va, con un'espressione sdegnata da fare invidia al Pelide Achille scippato della bella Briseide. Alice lo guarda per un attimo, scrolla le spalle e comincia disegnare cerchi. Rudy allunga la mano verso la pipa.

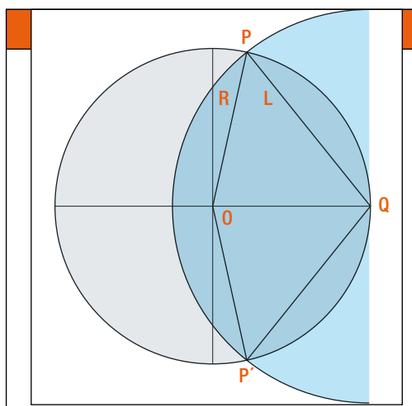
«Niente da dire, una sceneggiata di tutto rispetto. E solo per non affrontare un problema... Devo proprio procurarmi una di quelle poltrone con i braccioli che scattano e imprigionano chi ci è seduto sopra».





La soluzione del problema esposto in queste pagine sarà pubblicata in forma breve sul numero di ottobre, e in forma estesa sul nostro sito: www.lescienze.it. Potete mandare le vostre risposte all'indirizzo e-mail: rudi@lescienze.it.

La dieta di Sofia K.



La mucca Sofia K. è legata al punto *Q*, posto sulla circonferenza dell'aiuola centrata in *O* e di raggio *R*, con una corda di lunghezza *L*. Questo valore è stato scelto in modo che Sofia K. possa mangiare solo metà dell'erba. Detti *P* e *P'* i punti in cui il guinzaglio intercetta il bordo dell'aiuola, si vede dalla figura che compaiono triangoli isosceli, anche se a prima vista potrebbero non sembrarlo. Questo non basta a risolvere il problema, ma per mezzo di altre osservazioni e di calcoli che troverete in dettaglio su http://rudimatematici-lescienze.blogautore.espresso.repubblica.it/, si riesce a determinare che la corda *L* deve avere lunghezza pari a 1,158728*R*.

Illustrazioni di Stefano Fabbri